



TAXAS DE RENOVAÇÃO DE AR EM CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO CRUZADA EM APARTAMENTOS DE TIPOLOGIA SIMPLES

J. A. G. Saraiva; F. V. Marques da Silva & P. R. P. dos Santos¹

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Departamento de Estruturas

Núcleo de Dinâmica Aplicada

Av. do Brasil, 1799 Lisboa Codex – Portugal

Fax +351 1 846 3457

Email: jsaraiva@lnec.pt

¹ Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande (RS), Brasil

RESUMO A presente comunicação apresenta um método, relativamente simples, de estimar o fluxo de ar, através da edificação, associado a processos de ventilação natural. Recorre como base aos métodos clássicos de análise de escoamentos em condutas considerando como fonte o diferencial de pressão básico, imposto pelo escoamento entre as aberturas de entrada e saída, e permite a construção de uma curva característica equivalente, tomando em consideração séries e paralelos, associados ao sistema de comunicações interiores mas em que as perdas existentes se consideram exclusivamente ocorrendo nas aberturas de passagem, que funcionam como singularidades. Não se consideram os efeitos térmicos e pressupõe-se uma análise das condições de pressão impostas pelo vento sobre a superfície exterior que permite definir o sentido das circulações internas. Por esta razão o método é particularmente apropriado ao caso de tipologias simples.

ABSTRACT A simplified procedure aiming to assess natural ventilation rates through buildings is presented. An analogy with internal pipe flow is considered though only singularities (openings) are taken into account. The flow source is the

pressure difference as induced by the wind over the building, namely at those openings to the exterior and the general it assumes that the general direction of the internal flows can be established a priori.

1. Base do Método

Num sistema clássico de ventilação é usual separar a instalação propriamente dita, que conduz o fluido aos pontos de utilização, da fonte (o ventilador) ainda que esta seja integrada na instalação. A fonte fornece a energia que põe o fluido em movimento, vence as perdas (devidas no essencial ao atrito) que se verificam ao longo da instalação e entrega-o nas condições (caudal e pressão) pretendidas.

No método clássico aplica-se a equação generalizada de Bernouilli entre o pontos de entrada (índice e) e saída (índice s) do fluido, a qual se escreve (em termos de energia por unidade de peso, unidades m):

$$\frac{p_e}{\rho g} + \frac{u_e^2}{2g} + z_e + H = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{u_s^2}{2g} + z_s + \Delta h_{es}$$

sendo p a pressão (Pa), ρ a massa volúmica (kg/m^3), g a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$), u a velocidade (m/s), z a cota (m), H é a chamada altura de elevação (m) e Δh a chamada perda de carga (m).

Pode demonstrar-se que no caso de instalações em circuito fechado os termos da pressão são compensados pelas variações de cota e, se se admitir que a energia cinética é incluída nas perdas, a equação reduz-se a:

$$H = \Delta h_{es}$$

isto é, ao escoamento deve ser fornecida, através de uma fonte, a energia que é dissipada pela instalação, incluindo a energia cinética.

Ora o escoamento através de uma edificação (por exemplo no interior de um apartamento entre as aberturas nas fachadas de barlavento e sotavento) está exactamente nesta situação em condições de escoamento isotérmico e atmosfera neutra. Quer do lado da entrada quer do lado da saída reina a pressão atmosférica e a energia do escoamento que atravessa a edificação é dissipada no exterior, aplicando-se a equação acima.

A questão resume-se a exprimir de forma apropriada os dois termos da equação.

2. A Fonte do Escoamento

Quando o vento atmosférico incide sobre um obstáculo o campo de velocidades é alterado e isso traduz-se em variação (mesmo que apenas em direcção) da quantidade de movimento do escoamento a que devem corresponder forças aplicadas pelo corpo. No caso particular de corpos não fuselados essas forças traduzem-se numa distribuição de pressões sobre o corpo sendo corrente o aparecimento de sobrepressões nas zonas de barlavento e de sucções nas de sotavento. É corrente que essas distribuições sejam expressas a partir dos chamados coeficientes de pressão, C_p expressos por

$$C_p = \frac{P_i - P_0}{q}$$

onde q é a pressão dinâmica do escoamento exterior ($q = \frac{1}{2} \rho u_0^2$) onde u_0 é a velocidade do vento exterior a uma dada altura de referência (a altura do edifício, por exemplo). As distribuições dependem do rumo do vento e das características da zona envolvente, não sendo imediato ir além de aspectos qualitativos.

Felizmente para corpos não aerodinâmicos as distribuições são muito pouco afectadas pela velocidade do escoamento pelo que se pode recorrer à muita bibliografia existente centrada em aspectos de dimensionamento e segurança associados à acção do vento. Essa bibliografia encontra-se muitas vezes já transposta para códigos e normas em muitos países, os quais podem ser usados como fonte de informação inicial.

Recolhidas na bibliografia, estimadas a partir da própria experiência dos projectistas, ou medidas em túneis aerodinâmicos, conhecidas essas distribuições bem como os regimes de vento local é imediato aceder ao valor que toma o H . Basicamente a diferença dos valores da pressão estática induzida pelo vento na zona da abertura de admissão (em regra positiva) e na zona da abertura de saída (em regra negativa). Isto é

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} = (C_{pe} - C_{ps}) \frac{u_0^2}{2g}$$

3. Perda de Carga. Curva Característica da Instalação

A dissipação de energia ao longo de uma instalação processa-se através de dois mecanismos. Um, a chamada perda em linha, correspondente ao atrito ao longo das condutas, proporcional ao comprimento (adimensionalizado) destas, o outro associado às perdas que se verificam nos elementos singulares (normalmente designados por acidentes ou singularidades) existentes ao longo daquela e de que são exemplos característicos, curvas, válvulas, contracções e alargamentos, Em qualquer dos casos para escoamentos que se desenvolvem a elevados números de Reynolds, Re , verifica-se que qualquer dos dois termos é pesado por um coeficiente, que no caso da linha depende não apenas de Re mas da rugosidade da conduta e o outro, sensivelmente constante numa gama muito grande de números de Re , que é próprio de cada singularidade, multiplicado pelo termo associado à energia do escoamento.

$$\Delta h = 4f \frac{l u^2}{d 2g} \quad \text{e para o segundo} \quad \Delta h = k \frac{u^2}{2g}$$

Para o primeiro escreve-se $\Delta h = 4f \frac{l u^2}{d 2g}$ e para o segundo $\Delta h = k \frac{u^2}{2g}$ onde f é o chamado factor de atrito (função do Re e da rugosidade relativa da conduta), l é o comprimento, d o diâmetro e k é o chamado coeficiente de perda de carga.

As instalações são uma montagem de condutas e acidentes em série (isto é, sequencialmente ligados) ou em ramos (constituídos por condutas e acidentes que confluem num mesmo ponto).

Os ramos, por sua vez, são normalmente separados em paralelos, quando os ramos para além do ponto comum de separação se voltam a unir num mesmo ponto (ou em pontos distintos mas com as mesmas condições locais), e ramificações quando os ramos divergem a partir de um ponto comum e terminam em pontos com características distintas. No caso particular de ventilação, sem pressurização dos espaços, dado que as entregas, independentemente das linhas percorridas pelo fluido, se faz à pressão atmosférica, todos os ramos se configuram como paralelos.

Num processo de ventilação natural isotérmico a situação encontrada e o trajecto percorrido pelo ar através da edificação pode ser assemelhado exactamente a uma instalação constituída por "séries" e "paralelos" se os coeficientes de pressão na envolvente na zona das aberturas de entrada e de saída tiverem valores idênticos (caso mais simples uma só entrada e uma saída ainda que situações como duas saídas para um poço de ventilação ou duas janelas na fachada de barlavento se incluam igualmente nesta situação) ou assemelhado a um sistema com ramificações se os coeficientes de pressão sobre as diferentes aberturas forem todos distintos. A análise dos fluxos para os dois primeiros casos é relativamente simples e apresentada seguidamente.

Pode demonstrar-se que para as séries se verifica que a perda de carga global é igual à soma das perdas de carga parciais (fala-se muitas vezes em analogia eléctrica), isto é:

$$k_{eq} = \left(\sum k_i \frac{u_i^2}{u_{ref}^2} \right)$$

ou seja a característica da conduta equivalente (que produz a mesma perda de carga quando circula o mesmo caudal) a uma série é a soma das características de cada um dos elementos, independentemente de serem singularidades ou linha, pesadas pela velocidade em cada ponto da instalação. Ora em caso de escoamentos incompressíveis e isotérmicos a equação de conservação da massa resume-se a $u_1 A_1 = u_2 A_2$ pelo que a equação acima pode ser reescrita

$$k_{eq} = \left(\sum k_i \frac{A_{ref}^2}{A_i^2} \right)$$

De forma semelhante se pode concluir que o equivalente a um paralelo pode ser expresso por:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \sum \frac{1}{k_i} + 2 \sum \frac{1}{\sqrt{k_i k_j}} [i \neq j]$$

com um conjunto de termos adicionais em relação ao que seria de esperar por aplicação da analogia eléctrica.

Não é difícil igualmente determinar a repartição de caudais pelos diferentes ramos do paralelo uma vez que o equilíbrio de pressões exige a igualdade das perdas independentemente do trajecto seguido pelo ar. Para o caso de dois ramos demonstra-se, sem dificuldade de maior, que a solução é dada pela resolução de uma equação do 2º grau.

$$\alpha = \frac{k_B \pm \sqrt{k_A k_B}}{k_B - k_A}$$

onde α representa a fracção do caudal e os k as perdas de carga, respectivamente dos ramos A e B. Note-se que das duas soluções possíveis da equação de 2º grau uma é maior que a unidade o que não tem qualquer correspondência na realidade física.

Com uma definição de equivalentes de séries e paralelos pode-se agora definir a curva característica da instalação, isto é, que tem as mesmas perdas de carga que a instalação física circulando o mesmo caudal, Q . Para isso é preciso seguir algumas regras do tipo das aplicadas em Álgebra sobre a sequência das operações: em primeiro lugar constroem-se os equivalentes das séries em cada ramo de um paralelo, depois o equivalente do paralelo e finalmente a nova série resultante....

A solução final será sempre do tipo

$$Q = u_0 A_{ref} \frac{1}{k} \sqrt{c_{pe} - c_{ps}}$$

4. O Caso da Ventilação Natural em Tipologias Simples

A aplicação ao caso de ventilação natural em tipologias simples é agora fácil. Em primeiro lugar admite-se que as perdas de carga em linha são nulas. Isto significa que as perdas se verificam exclusivamente na passagem através das aberturas (portas e janelas) o que não deve traduzir-se em erro significativo pois a secção recta de passagem de uma sala é tipicamente 3 a 4 vezes superior (pelo menos) à dimensão da abertura o que significa uma perda de carga ao longo do compartimento (admitindo uma velocidade uniforme) pelo menos uma ordem de grandeza inferior (pesada como já visto pelo quadrado da relação de áreas) à que se verifica na abertura.

Isto é, a situação básica pode ser resumida como um fluxo de ar promovido por uma fonte imposta pelo diferencial de pressões resultante da acção do vento sobre as aberturas de entrada ou saída numa instalação caracterizada pelas perdas de carga através das aberturas e que depende exclusivamente da forma como a circulação interna é feita.

Dois pontos merecem alguma atenção. O primeiro prende-se com o facto de ser fácil variar as áreas das aberturas e, portanto, a característica da instalação equivalente devendo, com vista a avaliar o efeito das eventuais soluções a tomar (maior ou menor abertura de janelas e portas, existência de bandeiras e de gelsias ou persianas, grelhas de ventilação ...) no controlo das taxas de ventilação efectuar um estudo variando estes parâmetros; o segundo é que na quase totalidade dos casos as aberturas internas são de forma rectangular e, como tal, a sua característica é a mesma tomando valores entre 2 e 3. Na bibliografia da especialidade não é difícil encontrar valores típicos de perda de carga para soluções correntes.

Note-se todavia que este método só é directamente aplicável quando é possível definir *a priori* os trajectos do fluxo de ar no interior das edificações o que deve ser analisado antes da aplicação

5. Casos de Aplicação

Considere-se o apartamento representado na figura numa condição em que o vento sopra perpendicularmente à fachada indicada, com uma velocidade $u_0 = 4$ m/s, dando origem à distribuição de pressões igualmente ali representada.

Por uma questão de simplicidade, e dado que as aplicações têm uma finalidade exclusivamente ilustrativa, considera-se sempre portas e janelas completamente abertas ou fechadas sendo as áreas respectivas de $1,5 \text{ m}^2$ e de $0,75 \text{ m}^2$. Consideram-se as perdas de carga iguais para todas as aberturas (excepto se referido) com um valor de $\xi_i = 2,5$.

Caso 1: Circulação entre os quartos 1 e 2 com portas e janelas abertas e todas as outras portas de comunicação (hall, casas de banho e quarto 3) fechadas. O escoamento irá processar-se da zona de maior pressão (janela da fachada do quarto 1) para a de menor pressão (janela da fachada do quarto 2). Trata-se, obviamente de uma série (janela, porta, porta, janela) donde resulta

$$k = \sqrt{\sum_i \frac{\xi_i}{A_i^2}} = 3,33$$

vindo para velocidade através da janela 1 (referência)

$$U_1 = \sqrt{0,6 - (-0,4)} u_0 \cdot \frac{1}{3,33} = 1,2 \text{ m/s}$$

e para caudal de renovação de ar

$$Q = 1,2 \times 0,75 = 0,9 \text{ m}^3 / \text{s} \Leftrightarrow 3240 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Caso 2: Circulação entre o quarto 1 e a casa de banho. Novamente se terá uma série (janela, porta, porta, janela) mas o diferencial de pressão é agora menos uma vez que a janela da casa de banho dando para um saguão tem um coeficiente de pressão menor além da menor área de comunicação ($0,375 \text{ m}^2$). A repetição dos cálculos do caso 1 conduz a um valor de $k = 3,95$ (indicando que parte do controlo do fluxo de ar é agora ditado pela janela mais pequena) e uma velocidade associada através da janela do quarto 1 $U_1 = 0,9$ m/s, isto é apenas 75% do caso anterior.

Caso 3: Circulação entre o quarto 1 e a casa de banho. Em vez da abertura franca considere-se que a porta da casa de banho está normalmente fechada mas que dispõe, na almofada inferior, de uma grelha com uma área útil de $0,25 \text{ m}^2$ e com uma perda de carga importante ($k \sim 5$). Esta situação traduz-se num valor de $k = 14,7$ (cerca de 4 vezes maior que o valor do caso anterior) o que significa, para as mesmas condições de vento, uma velocidade através da abertura de referência (a janela do quarto 1) $U_1 = 0,24$ m/s

Caso 4: Circulação entre a sala (sobrepessões) e o resto do apartamento (a mesma depressão, excepto quarto de banho e quarto 1 cujas portas se consideram fechadas). A situação aqui encarada corresponde a um conjunto de paralelos - quartos 2 e 3 (paralelo no corredor comum); sala pequena e cozinha (cozinha como ponto comum); paralelo dos dois (hall como ponto comum) – em série com a sala grande (onde as duas janelas em paralelo correspondem a uma área dupla da considerada nos outros casos. $1,5 \text{ m}^2$). Face às áreas e valores de k das aberturas apresentados obtêm-se pela aplicação das expressões atrás escritas:

$k_{eq \text{ quartos}}=0,59$; $k_{eq \text{ cozinha}}=1,69$, $k_{eq \text{ hall}}= 0,25$; $k_{eq}=1,75$, donde resulta uma velocidade de admissão de ar através das janelas da sala grande de $U_1=2,3 \text{ m/s}$.

O caudal reparte-se, face aos valores de k_{eq} obtidos, em 62% para a cozinha e 38% para o corredor de acesso aos quartos. O primeiro reparte-se numa proporção de 55% pela cozinha e 45% pela sala pequena; o segundo é igualmente (50%) repartido pelos quartos 2 e 3. Nestas condições e em termos de fluxo global teremos que o caudal entrado através da sala grande se reparte com uma saída de 34% pela janela da cozinha; 28% pela janela da sala pequena; e 19% por cada um dos quartos 2 e 3.

6. Comentários e Conclusões

O método apresentado permite estimar os caudais de ventilação natural em situações de escoamento que podem ser definidas, em termos qualitativos, *a priori*. O método permite mesmo a solução em casos de alguma complexidade e mostra claramente que os fluxos associados à ventilação natural podem ser expressos em função da velocidade do vento pesando a influência da distribuição de pressão sobre as superfícies exteriores, à custa do diferencial dos respectivos coeficientes de pressão, e dos processos internos, à custa de um coeficiente de perda de carga equivalente. Isto é, as taxas de ventilação podem ser expressas com um valor potencial de velocidade através da abertura de admissão, pesado pelas perdas internas e pela dimensão das aberturas internas e de saída (o valor de k_{eq} de certa forma correspondendo a uma combinação de valores dos chamados coeficientes de vazão). O caudal de ventilação estimado é o produto deste valor de potencial pela área efectivamente aberta.

A título ilustrativo note-se que o caudal estimado para o caso 1 corresponde se se considerar o quarto 1 ($16\text{m}^2 \times 3\text{m}$) a 67,5 RPH (renovações por hora), se se considerar o quarto 2 ($12\text{m}^2 \times 3\text{m}$) a 90 RPH, e se se considerar todo o espaço envolvido a cerca de 34 RPH. Isto é, a indicação de valores de RPH exige uma clara definição dos espaços envolvidos.

7. Referências

Idel'cik, I.E. (1979)– Memento des pertes de charge – Eyrolles, 3Ed.,Paris

Marques da Silva, F.V.; Viegas, J.; Gonçalves da Silva, F.A.; Santos, P.R. & Saraiva, J.A.G. (1998): Assessing Natural Urban Ventilation Through an Integrated Model – 19th Annual AIVC Conference, Oslo

Santos, P.R.; Marques da Silva, F.V.; Viegas, J.; Saraiva J.A.G. & Carvalho, M.G. (1998): Air Flow Rates in Buildings – 8 Congresso Chileno de Engenharia Mecânica, Concepcion

Saraiva, J.A.G.; Dias Delgado, J. & Borges, A.J. (1985): Pavilhões industriais. Solicitações, interferência e ventilação natural, LNEC, Lisboa

Saraiva, J.A.G.; Dias Delgado, J. & Borges, A.J. (1985): Um programa de cálculo automático de ventilação natural: VENTIL.FOR, LNEC, Lisboa

