VENTILAÇÃO CRUZADA E A EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE

Cross ventilation and the continuity equation

SANTOS, Leonardo Sioufi Fagundes dos Santos
Universidade Federal de São Paulo, campus de Diadema

NETO, Maria de Fatima Ferreira
Universidade Paulista
Apoio Acústico Ltda.

RESUMO: Neste trabalho, a ventilação em ambientes internos é estudada no contexto da Mecânica dos Fluidos, um ramo da Física. Através da equação da continuidade para fluidos incompressíveis, este trabalho define um fator de ventilação: a velocidade de saída do ar é a de entrada multiplicada pelo fator de ventilação. As aplicações do fator de ventilação são ilustradas em ambientes com duas aberturas e no interior deles. O fator de ventilação também é usado em estimativas em ambientes com mais de duas aberturas. O trabalho também discute a situação onde o vento é amortecido pelo atrito ou acelerado por exaustores. O trabalho abre perspectiva para a aplicação do fator de ventilação em projetos residenciais. O principal resultado é que se a área de entrada é maior do que a de saída, o ar sai do ambiente mais veloz do que entrou; se a área de entrada é menor do que a de saída, a situação é inversa.

Palavras-chave: Ventilação cruzada; equação da continuidade; fator de ventilação.

ABSTRACT: In this work, ventilation in indoor environments is studied in the context of the Fluid Mechanics, a branch of Physics. Through the continuity equation for incompressible fluids, this work defines a ventilation factor: the air output velocity is the input velocity multiplied by the ventilation factor. Ventilation factor applications are illustrated in environments with two openings and within them. The ventilation factor is also used in estimate in environments with more than two openings. The paper also discusses the situation where the wind is damped by friction or accelerated by exhaust fans. The work opens perspective for the application of the ventilation factor in residential projects. The main result is that if the entrance area is larger than the exit area, the air leaves the environment faster than it entered; if the input area is smaller than the output area, the situation is reversed.

Keywords: Cross ventilation; continuity equation; ventilation factor.

INTRODUÇÃO

O entendimento da ventilação no interior de ambientes residenciais é fundamental na Arquitetura e na Engenharia Civil. Manuais de ventilação são parte integrante da formação de arquitetos e engenheiros civis (BITTENCOURT, 2010). Além disso, as pesquisas sobre ventilação figuram entra as mais

importantes da atualidade (ABDELATIA, 2010; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; RITTER, 2014).

Um entendimento mais profundo da ventilação exige noções elementares de Física. Levando-se em conta a definição de vento como “o ar em movimento”, o ramo da Física necessário ao estudo da ventilação é a Mecânica dos Fluidos.

O conceito de fluido na Física é muito complexo e apela para a noção de “tensão de cisalhamento” (FIFE, 2000; BRUNETTI, 2008; MACDOUGH, 2009; BRAITHWAITE, 2011). A caracterização do ar como um fluido foge dos objetivos deste trabalho, mas é necessário abordar a questão da compressibilidade. Os fluidos podem ser compressíveis ou incompressíveis. “Fluidos compressíveis” são aqueles que podem ser comprimidos ou expandidos significativamente. O aquecimento ou o resfriamento de um fluido compressível provocam respectivamente uma expansão ou uma compressão em larga escala. Os gases são fluidos compressíveis. O ar é uma mistura de gases, logo, ele também é um fluido compressível. Os “fluidos incompressíveis” são os não compressíveis. Líquidos são fluidos incompressíveis. A expansão ou compressão de um líquido devido a variações de temperatura é de difícil percepção.

Fluidos compressíveis sem trocas térmicas significativas e com velocidades inferiores a 100m/s têm densidade aproximadamente uniforme (OLIVEIRA Jr., 2017; NAKAYAMA; BOUCHER, 1999). Apenas os furacões chegam a velocidades superiores a 33m/s (CPTEC, 2012). Então, nos ventos cotidianos, o ar pode ser tratado como se fosse um fluido incompressível. O tratamento do ar como se um fluido incompressível é fundamental em vários problemas de Mecânica dos Fluidos (BOUCHER, 1999; FIFE, 2000; NAKAYAMA; BRUNETTI, 2008).

O objetivo deste trabalho é a determinação ou apenas uma estimativa da relação entre as velocidades do vento em locais distintos no interior de um ambiente. Em particular, o presente artigo fornece uma previsão de velocidade de saída do ar de um ambiente a partir da velocidade de entrada. Especificando o objetivo ainda mais, esta pesquisa define um “fator de ventilação”, um número multiplicado pela velocidade do vento de entrada em um ambiente resultando na de saída.

A justificativa desta pesquisa não é apenas técnica, mas humana. Além de ser determinante no conforto térmico (RITTER, 2014; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014), a ventilação é uma questão de saúde pública porque um ambiente com ar viciado é insalubre (WHO, 2000). Há ainda um aspecto ambiental e econômico no estudo da ventilação porque um ambiente bem ventilado pode dispensar total ou parcialmente o uso de ventiladores e ares-condicionados com um correspondente decréscimo no consumo de energia.

As seções deste artigo seguem os seguintes passos: apresenta-se a equação da continuidade, uma relação fundamental no estudo da ventilação; a partir desta equação, este trabalho define o fator de ventilação; exemplos de aplicações do fator de ventilação são dados no estudo das velocidades de entrada e de saída de um ambiente com duas aberturas; outras aplicações são estendidas para a velocidade do vento no interior do próprio ambiente; na sequência, há uma generalização do fator de ventilação para ambientes com mais de duas aberturas, onde neste último caso, as velocidades de saída são apenas estimadas; coloca-se uma breve descrição da relação do fator de ventilação com o amortecimento ou aceleração do vento interno; o trabalho termina com as considerações finais.

Equação da continuidade para fluidos incompressíveis (ECFI)

O fluxo de um fluido é o volume que passa por determinada área dividido pelo tempo consumido. Por exemplo, se 0,005m^3 de água[5] passam pela seção transversal de uma tubulação em um segundo, o fluxo é 0,005m^3/s (ver fig.1).

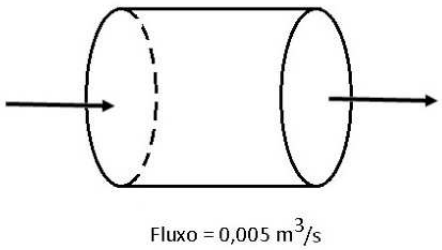

Figura 1 – Fluxo de um fluido passando por uma tubulação.

[5] O volume 0,005 m^3 pode parecer pequeno, mas levando-se em conta que 1m^3 é equivalente à 1000 litros, então 0,005m^3 = 0,005 x 1.000L = 5L

O fluxo pode ser reescrito como a área multiplicada pela velocidade. Como exemplo, se a água tem velocidade 0,5m/s e a área da tubulação é de $0,01m^2$, o fluxo vale 0,5m/s x $0,01m^2$ = $0,005m^3/s$ (ver fig.2).

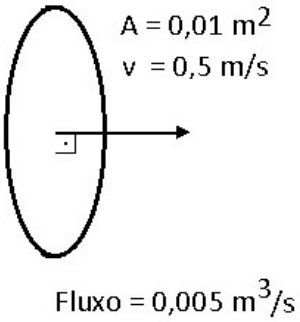

Figura 2 – Fluxo de um fluido com velocidade v = 0,5m/s, passando por área $A = 0,01m^2$.

Neste ponto, é possível deduzir a equação da continuidade para fluidos incompressíveis. Considerando um tubo com uma entrada e uma saída com áreas respectivamente de A_{entra} e A_{sai}, o fluido entra com velocidade v_{entra} e sai com v_{sai}. O fluxo na entrada é $A_{entra}v_{entra}$, enquanto na saída, $A_{sai}v_{sai}$ (ver fig.3).

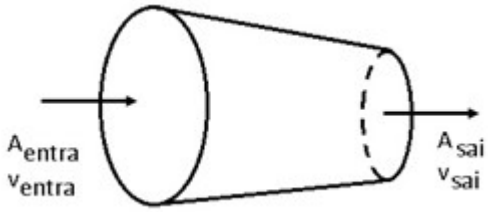

Figura 3 – Fluxo de um fluido entrando em uma área A_{entra}, com velocidade v_{entra} e saindo com área A_{sai} e velocidade v_{sai}. Na entrada e na saída os fluxos são iguais e $A_{entra} > A_{sai}$.

Como o fluido não se comprime ou expande, a mesma quantidade de fluido que entrou no tubo deve ser a mesma que saiu. Consequentemente, o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída.

$$A_{entra}v_{entra} = A_{sai}v_{sai} \qquad (1)$$

A equação (1) é denominada “equação da continuidade para fluidos incompressíveis”. De agora em diante no texto, a referência à equação será feita através da sigla ECFI.

Caso o fluido seja compressível, é possível que entre mais fluido no tubo do que saia. Por exemplo, se o tubo sofre um rápido aquecimento, o fluido em seu interior se expande, provocando mais saída do que entrada. Caso o tubo se resfrie, o fluido se comprime e há mais entrada do que saída. Então, o fluxo de entrada e saída não é o mesmo e a equação ECFI não pode ser aplicada para fluidos compressíveis. Há uma equação da continuidade para fluidos compressíveis, mas ela não será usada neste trabalho.

Fator de ventilação (F_v)

O ar pode ser tratado como um fluido incompressível na ventilação dos ambientes residenciais. Cômodos de uma residência com apenas uma entrada e uma saída de ar não são tubos, mas as aberturas comportam-se como as seções transversais de um cano. Por exemplo, uma sala com uma porta e uma janela pode ter uma circulação de ar da primeira abertura para a segunda. Então, a ECFI pode ser aplicada no estudo da ventilação no interior das residências desde que as áreas A_{entra} e A_{sai} e as velocidades v_{entra} e v_{sai} estejam associadas às respectivas aberturas.

Para facilitar a aplicação da ECFI nos cômodos com duas aberturas, é possível isolar a velocidade de saída v_{sai} na equação (1).

$$v_{sai} = \left(\frac{A_{entra}}{A_{sai}}\right) v_{entra} \qquad (2)$$

Na equação (2), a velocidade de saída do fluido v_{sai} é o fator A_{entra}/A_{sai} multiplicado pela de entrada v_{entra}. O fator de ventilação, representado como F_v, devido à ECFI pode ser definido como

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} \qquad (3)$$

A velocidade de saída pode ser reescrita simplesmente como a velocidade de entrada multiplicada por F_v.

$$v_{sai} = F_v\, v_{entra} \quad (4)$$

Se a área de entrada é maior do que a de saída ($A_{entra} > A_{sai}$) na expressão (3), o F_v é maior do que 1 (ver fig. 3). Se $F_v > 1$ na expressão (4), o vento de saída é mais veloz do que o de entrada. Para uma área de saída maior do que a de entrada ($A_{entra} < A_{sai}$), o F_v é menor do que 1 e a velocidade de saída em (4) é menor do que na entrada (ver fig.4).

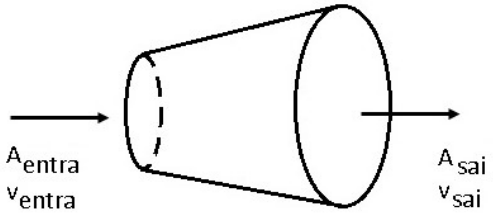

Figura 4 - Fluxo de um fluido entrando em uma área A_{entra}, com velocidade v_{entra} e saindo com área A_{sai} e velocidade v_{sai}. Na entrada e na saída os fluxos são iguais e $A_{entra} < A_{sai}$.

Se as áreas de entrada e de saída são as mesmas ($A_{entra} = A_{sai}$), $F_v = 1$ e a velocidade de entrada e de saída são iguais na expressão (4) (ver fig. 5).

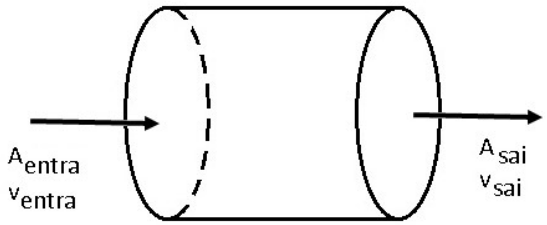

Figura 5 – Fluxo de um fluido entrando e saindo em seções transversais com áreas iguais.

Seguem abaixo alguns exemplos da aplicação do F_v.

Ventilação em ambientes com duas aberturas

Em geral, quartos, salas e escritórios possuem pelo menos duas aberturas. Uma das aberturas é uma porta. A segunda abertura pode ser uma janela ou outra porta. Um cômodo com apenas uma porta e sem janelas não será abordado neste trabalho.

Por exemplo, uma sala pode ter uma porta com altura 2m e largura 1m. A área da porta é de 2m x 1m = $2m^2$. A janela da sala pode medir 1m de largura por 0,5m de altura, uma área correspondente de 1m x 0,5m = $0,5m^2$ (ver fig.6).

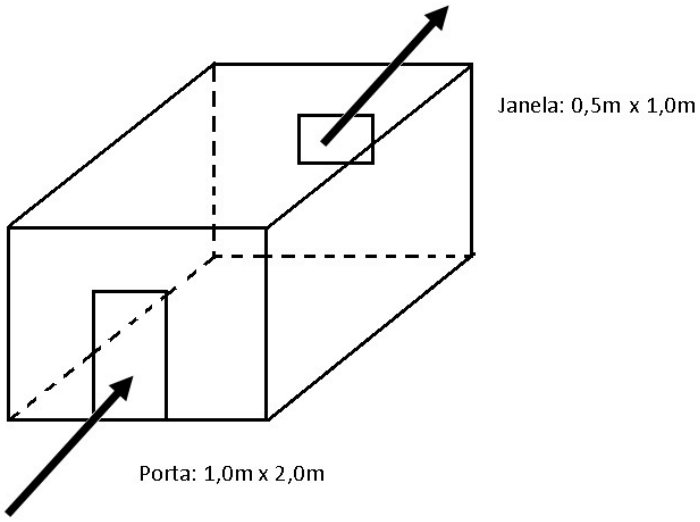

Figura 6 – Fluxo de fluido passando por uma sala.

Considerando que o vento entra pela porta (A_{entra} = $2m^2$) e sai pela janela (A_{sai} = $0,5m^2$), o F_v da equação (3) fica:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{2m^2}{0,5m^2} = 4$$

Então o vento na janela é 4 vezes mais rápido do que na porta. Por exemplo, se a velocidade do vento na porta é de 2m/s, na janela será de 2m/s x 4 = 8m/s.

O F_v inverte-se com a troca do sentido de velocidade do vento. Por exemplo, na mesma sala, se o vento flui da janela para a porta, as áreas de entrada e de saída ficam respectivamente A_{entra} = $0,5m^2$ e A_{sai} = $2m^2$ (ver fig.7).

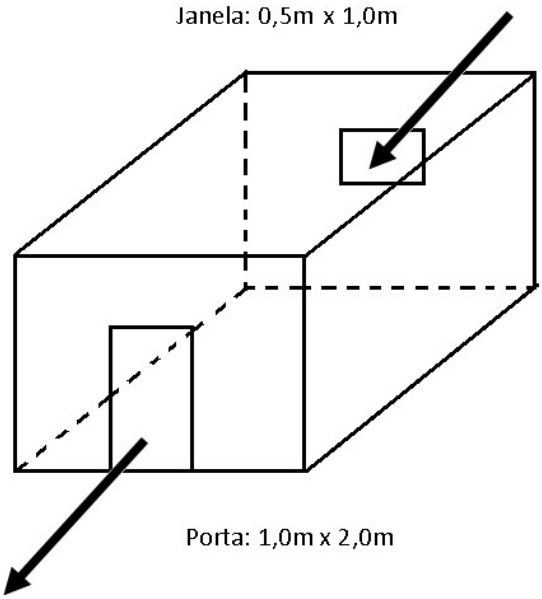

Figura 7 – Fluxo de fluido entrando e saindo em uma sala.

O fator de ventilação F_v fica:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{0{,}5m^2}{2m^2} = 0{,}25$$

Se a velocidade do vento na janela é 8m/s, o ar correrá na porta com 8m/s x 0,25 = 2m/s. O vento simplesmente mudou de sentido, mas os valores da velocidade do vento na porta e na janela não se alteraram.

Caso a velocidade de entrada na janela seja de 2m/s, o vento na porta atingirá 2m/s x 0,25 = 0,5m/s. Assim, se o vento entra com 2m/s respectivamente pela porta ou pela janela, a saída para outra abertura poderá ser de 8m/s (saída pela janela) ou 0,5m/s (saída pela porta).

Ventilação no interior onde há duas aberturas

A análise da velocidade do vento no interior de um ambiente é muito mais complicada do que nas aberturas. A velocidade do vento em uma janela ou porta é razoavelmente uniforme, enquanto no interior a situação é heterogênea. Além disso, fica mais difícil determinar a área que o ar atravessa em seu movimento. Para contornar esse problema, é interessante associar uma velocidade média da ventilação no interior do ambiente. Além disso, é necessário levar em conta as posições relativas das aberturas.

Aberturas frontais

Em primeiro lugar, é interessante fazer uma estimativa da velocidade média do vento para um ambiente em uma sala com aberturas em lados opostos. Neste caso, uma porta ficaria de um lado e a outra abertura (outra porta ou uma janela) na parede frontal (ver fig.8).

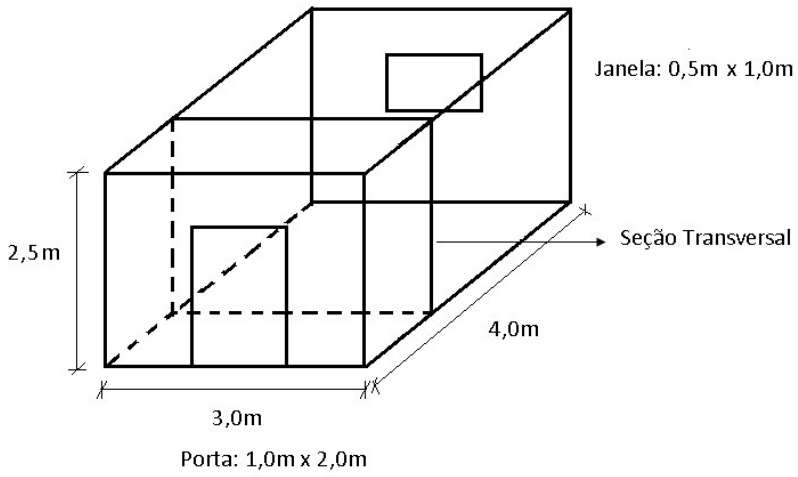

Figura 8 – Sala com aberturas frontais.

Na situação real, o vento faz vórtices e curvas no interior da sala. Mas é possível aproximar o vento por um fluxo uniforme que atravessa a sala de uma parede para a outra. A área por onde o ar passa corresponde à seção transversal da sala, que é equivalente a própria área das paredes onde estão as aberturas (ver fig.8). Com as áreas das aberturas de ar e a da seção transversal da sala, é possível calcular o F_v com a expressão (3).

Por exemplo, considera-se uma sala com altura 2,5m, 3m de comprimento e 4m de largura (ver fig.8). Em uma das paredes com comprimento 3m, há uma porta. Na outra parede com comprimento 3m, existe uma janela (ver fig.8). Então a área da seção transversal é dada pelo comprimento vezes a altura da sala, 2,5m x 3m = 7,5m^2 (ver fig.8).

Na sala descrita no parágrafo acima, há uma porta com área 2m^2. Se o vento entra pela porta, as áreas de entrada e de saída são A_{entra} = 2m^2 e A_{sai} = 7,5m^2. O fator de ventilação é dado por:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{2m^2}{7{,}5m^2} = \frac{4}{15} \approx 0{,}267$$

Se o vento entra pela porta com 2m/s, o ar passará pela sala com velocidade média de 2m/s x (4/15) = (8/15)m/s. O valor aproximado fica 2m/s x 0,267 = 0,534m/s.

O vento pode sair por uma janela com área 0,5m^2. Neste caso, as áreas de entrada e de saída correspondem respectivamente à seção transversal da sala e a janela, A_{entra} = 7,5m^2 e A_{sai} = 0,5m^2. O F_v (3) vale:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{7{,}5m^2}{0{,}5m^2} = 15$$

Se o vento passa pela sala com (8/15)m/s, ele sai pela janela com (8/15)m/s x 15 = 8m/s. Esse resultado é consistente com a seção anterior, onde um vento que entra por uma porta de 2m^2 com 2m/s sai por uma janela de 0,5m^2 com 8m/s. Caso o valor da velocidade do vento na sala seja aproximado por 0,534m/s, a velocidade na janela será de 0,534m/s x 15 = 8,01m/s.

Outro exemplo é a mesma sala com uma porta e uma janela com as mesmas áreas, mas colocadas nas paredes de largura 4m (ver fig.9).

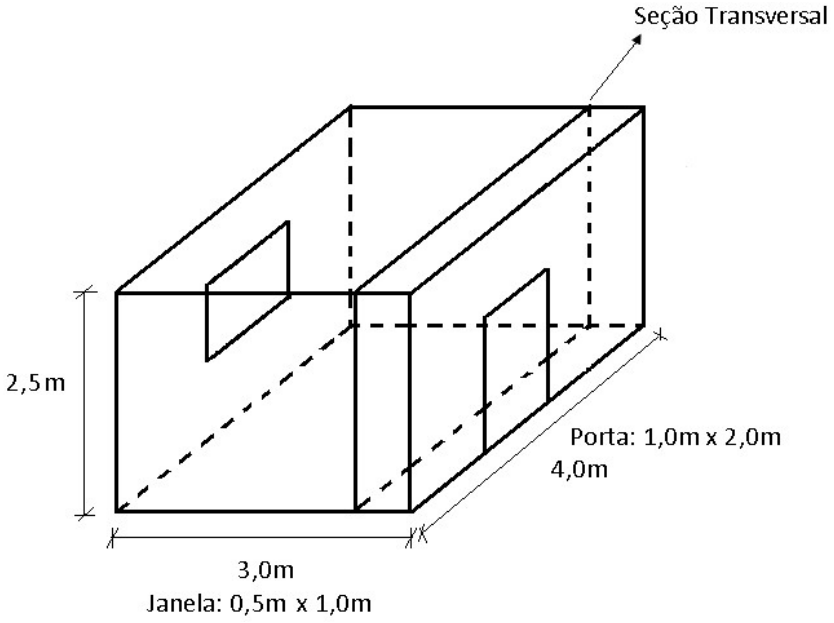

Figura 9 – Sala com aberturas frontais.

Neste caso, a área da seção transversal fica 4m x 2,5m = 10m^2. Se o vento entra pela porta (A_{entra} = 2m^2), o fator de ventilação fica:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{2m^2}{10m^2} = 0{,}2$$

Caso o vento entre pela porta com velocidade 2m/s, a velocidade na sala será de 2m/s x 0,2 = 0,4m/s.

Estes exemplos são suficientes para ilustrar a estimativa da velocidade média do vento na sala. O ar poderia fluir da janela para a sala e os cálculos seriam análogas.

Aberturas ortogonais

As aberturas de um ambiente podem estar dispostas em paredes perpendiculares. Neste caso, a seção transversal atravessada pelo vento fica na diagonal do ambiente.

Por exemplo, na sala exemplificada na seção anterior, a diagonal da sala é dada pelo teorema de Pitágoras como

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5m$$

Como a diagonal é 5m e a altura, 2,5m, a área fica 5m x 2,5m = 12,5m^2 (ver fig. 10).

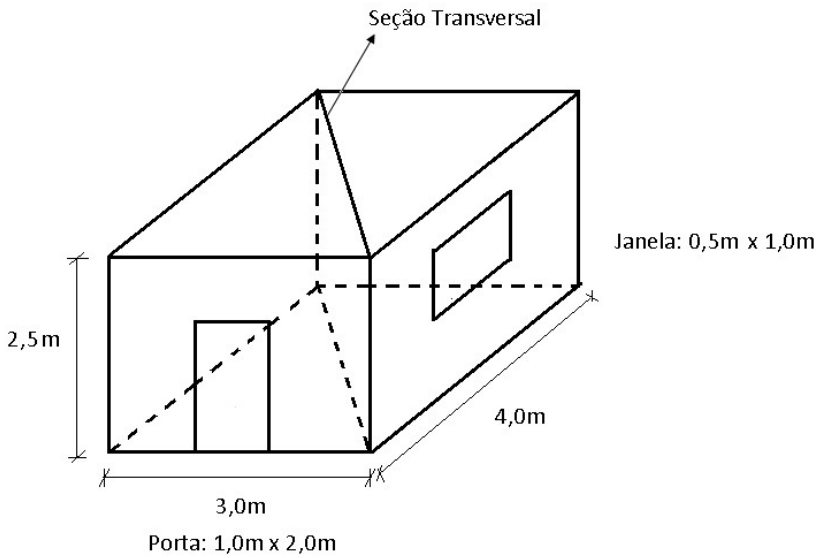

Figura 10 – Sala com as aberturas ortogonais.

Se a porta com área de $2m^2$ e a janela de $0,5m^2$ estão respectivamente nas paredes de largura 3m e comprimento 4m, a área por onde passa o vento é de 12,5 m^2. Quando o vento entra pela janela, o F_v é de:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{0,5m^2}{12,5m^2} = 0,04$$

Se o vento entra pela janela com velocidade de 8m/s, a ventilação na sala é de 8m/s x 0,04 = 0,32m/s.
Caso o vento saia pela porta de área $2m^2$, o fator de ventilação fica:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{12,5m^2}{2m^2} = 6,25$$

Um vento que passa pela sala com velocidade média de 0,32m/s sairá pela porta com 0,32m/s x 6,25 = 2m/s. Novamente os resultados novos são consistentes com os dados já obtidos.

Ambiente com várias saídas de ar

Quando o ambiente tem três ou mais saídas de ar, a expressão (3) e o F_v perdem o significado porque não há mais uma única entrada ou saída de ar. Ainda assim, o fluxo de ar que entra deve ser igual àquele que sai.

Se o ar entra por duas aberturas (a) e (b) e sai por duas outras (c) e (d) (ver fig. 11), o fluxo de entrada é $A_av_a+A_bv_b$, enquanto o de saída vale $A_cv_c + A_dv_d$.

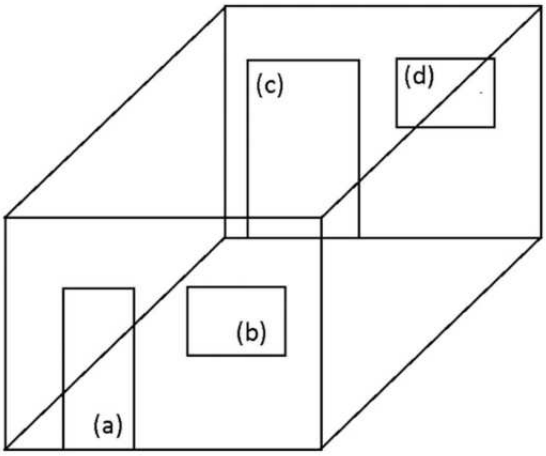

Figura 11 – Ambiente com duas entradas, (a) e (b), e duas saídas, (c) e (d).

Como o fluxo de entrada deve ser igual ao de saída, a ECFI fica:

$$A_a v_a + A_b v_b = A_c v_c + A_d v_d \quad (5)$$

Por exemplo, se o ar entra por duas aberturas com áreas de $A_a = 0{,}5m^2$ e $A_b = 1m^2$ e sai por outras duas outras com áreas $A_c = 2m^2$ e $A_d = 1{,}4m^2$ e as velocidades correspondentes às duas entradas e a uma das saídas são de $v_a = 2m/s$, $v_b = 2{,}2m/s$ e $v_c = 0{,}9m/s$, a velocidade de saída pela quarta abertura é dada pela equação (5).

$$0{,}5 \times 2 + 1 \times 2{,}2 = 2 \times 0{,}9 + 1{,}4 \times v_d$$
$$1 + 2{,}2 = 1{,}8 + 1{,}4 \times v_d$$
$$3{,}2 - 1{,}8 = 1{,}4 \times v_d$$
$$1{,}4 = 1{,}4 \times v_d$$
$$v_d = 1m/s$$

Quando as aberturas de entrada do vento são muito próximas entre si, é possível fazer uma aproximação onde a velocidade do ar é a mesma em todas elas. O mesmo pode ser dito em relação às aberturas de saída do ar. Neste caso, o F_v volta a ter significado, mas agora como estimativa. Reescrevendo na equação (5) as velocidades de entrada e de saída como uniformes ($v_a = v_b = v_{entra}$ e $v_c = v_d = v_{sai}$), chega-se à:

$A_a v_{entra} + A_b v_{entra} = A_c v_{sai} + A_d v_{sai}$

$$(A_a + A_b) v_{entra} = (A_c + A_d) v_{sai} \quad (6)$$

A área total de entrada do ar é $A_{entra} = A_a + A_b$, enquanto a área total de saída, $A_{sai} = A_c + A_d$. Substituindo $A_{entra} = A_a + A_b$ e $A_{sai} = A_c + A_d$ na relação acima:

$$A_{entra}\, v_{entra} = A_{sai} v_{sai} \quad (7)$$

A relação acima coincide com a equação (1). Logo, é possível chegar na relação (2) e definir o F_V (3).

No exemplo anterior, as velocidades de entrada eram bem próximas entre si, $v_a = 2m/s$ e $v_b = 2{,}2m/s$. Arredondando a velocidade de entrada nas janelas pela média, $v_{entra} = 2{,}1m/s$ e calculando as áreas de entrada e saída, $A_{entra} = A_a + A_b = 0{,}5 + 1 = 1{,}5m^2$ e $A_{sai} = A_c + A_d = 2+1{,}4 = 3{,}4m^2$, chega-se ao F_v :

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{1{,}5m^2}{3{,}4m^2} = \frac{15}{34} \approx 0{,}44$$

Assim, se o vento de entrada é 2,1m/s, o de saída fica 2,1m/s x (15/34) ≈ 0,93m/s. O valor do vento de saída nos cálculos exatos foram $v_c = 0{,}9m/s$ e $v_d = 1m/s$, o que indica uma boa estimativa para as velocidades de saída.

Se as velocidades nas entradas são próximas, mas as de saída são diferentes, a estimativa dada pelo fator de ventilação não é muito útil. Tomando o mesmo ambiente do exemplo desta seção ($A_a = 0{,}5m^2$, $A_b = 1m^2$, $A_c = 2m^2$ e $A_d = 1{,}4m^2$) com as mesmas velocidades de entrada ($v_a = 2m/s$ e $v_b = 2{,}2m/s$), mas com uma das velocidades de saída como $v_c = 0{,}1m/s$, a relação (5) fica:

$$0{,}5 \times 2 + 1 \times 2{,}2 = 2 \times 0{,}1 + 1{,}4 \times v_d$$
$$1 + 2{,}2 = 0{,}2 + 1{,}4 \times v_d$$
$$3{,}2 - 0{,}2 = 1{,}4 \times v_d$$
$$3 = 1{,}4 \times v_d$$

$$v_d = \frac{3}{1,4} \approx 2,14\text{m/s}$$

A velocidade de saída estimada é de 0,9m/s, um valor intermediário entre $v_c = 0,1$m/s e $v_d = 2,34$m/s. No entanto, a estimativa de 0,9m/s não é próxima da velocidade do vento em nenhuma das saídas. A estimativa é ruim.

Em geral, a expressão (6) pressupõe que as velocidades de entrada e de saída sejam próximas. Sem a expressão (6) não se chega em (7) e o F_v para ambientes com mais de duas aberturas não tem sentido. Assim, o F_v não tem significado ou estima mal as velocidades de saída caso as velocidades de entrada ou de saída sejam muito diferentes.

Amortecimento e aceleração do vento devido a fatores internos ao ambiente

Em uma sala vazia, o ar sofre atrito apenas com as paredes. Já em uma sala com móveis ou divisórias, o vento sofrerá atrito com outros corpos, reduzindo sua velocidade. Consequentemente, a velocidade de saída diminui. Uma queda na velocidade de saída corresponde a um decréscimo no fluxo $A_{sai}v_{sai}$. Pela ECFI (1), a velocidade de entrada deverá diminuir também. Assim, obstáculos a passagem do vento na sala não alteram o F_v porque este só depende das áreas de entrada e de saída, mas as velocidades correspondentes mudam.

Anteriormente, na seção “Ventilação em ambientes com duas aberturas”, foi dado um exemplo onde $F_v = 4$, $v_{entra} = 2$m/s e $v_{sai} = 8$m/s. Se na sala com obstáculos a velocidade do vento diminui 30% (o equivalente a uma multiplicação por 0,7), as velocidades de entrada e saída serão respectivamente $v_{entra} = 2\text{m/s} \times 0,7 = 1,4$m/s e $v_{sai} = 8\text{m/s} \times 0,7 = 5,6$m/s (ver fig.12).

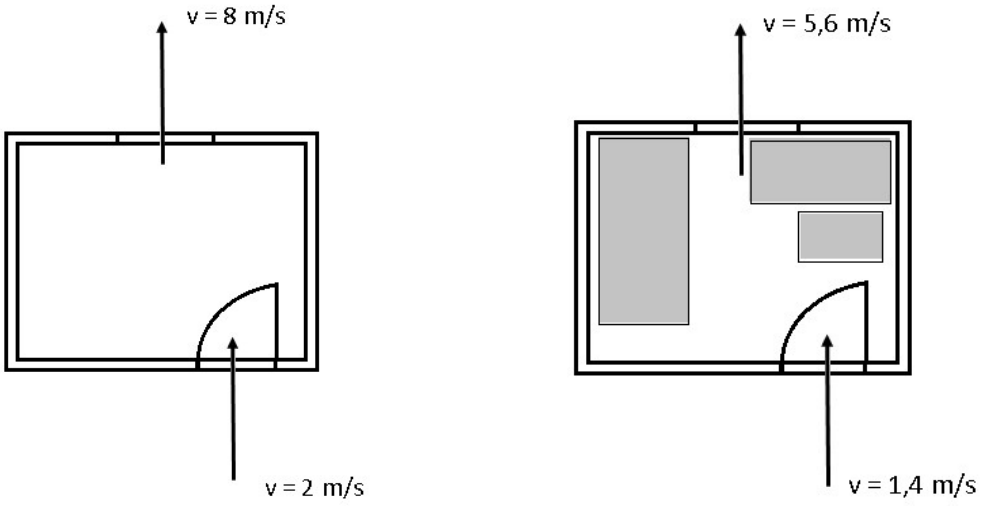

Figura 12 - Duas salas em análise: a da esquerda encontra-se vazia e a da direita com mobiliário.

É interessante mostrar que o F_v continua prevendo a velocidade de saída a partir da entrada.

$$v_{sai} = F_v\ v_{entra} = 4 \text{ x } 1{,}4\text{m/s} = 5{,}6\text{m/s}$$

Há uma série de pesquisas sobre a redução da velocidade do vento em ambientes devido aos obstáculos, posições das janelas, divisórias, etc. (BITTENCOURT; CANDIDA, 2010; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014.). É importante salientar que os fatores de redução devem ser aplicados nas velocidades de entrada e de saída. Caso contrário, a equação da continuidade (1) é violada e o modelo não se adequa a aproximação do ar como fluido incompressível.

A mesma conclusão também vale para a ventilação no interior do ambiente. No exemplo da seção “aberturas frontais”, a velocidade no interior do ambiente com as entradas em lados opostos nas paredes de largura 4m era de 0,4m/s. Caso a velocidade do vento na sala sofra a redução devido aos móveis, o resultado será 0,4m/s x 0,7 = 0,28m/s.

Outra causa de amortecimento do vento é a diminuição da área de entrada ou de saída. Por exemplo, se A_{entra} = 1,5m^2 e A_{sai} = 0,01m^2, a expressão (3) resulta em:

$$F_v = \frac{A_{entra}}{A_{sai}} = \frac{1{,}5\text{m}^2}{0{,}01\text{m}^2} = 150$$

Se o vento entra no ambiente com 2m/s, ele sai com 150 x 2m/s = 300m/s. A velocidade de saída corresponde a um furacão. Não se deveria nem usar a ECFI nesta situação porque o ar não se comporta como um fluído incompressível nesta velocidade. No entanto, é impossível que o vento entre com 2m/s por uma área de 1,5m^2 e saia por um minúsculo buraco de 0,01m^2 sem sofrer atrito. O que ocorre em um caso desses é um amortecimento no vento de entrada e de saída devido ao estreitamento da segunda abertura.

Assim como o vento pode ser amortecido por obstáculos, o exaustor pode ter efeito inverso. De acordo com a equação (1), se a velocidade de saída aumenta, a correspondente de entrada também deve aumentar. Retomando o exemplo da seção “Ventilação no interior onde há duas aberturas”, F_v = 4 e as velocidades de entrada e saída são 2m/s e 8m/s respectivamente. Caso o exaustor aumente a velocidade de saída para 10m/s, a velocidade de entrada também deve aumentar (um aumento de 1,25), a velocidade de entrada deverá aumentar para 2m/s x 1,25 = 2,5m/s. Analogamente ao caso do amortecimento do vento, é interessante mostrar como o F_v relaciona as velocidades de entrada e saída.

$$v_{sai} = F_v\, v_{entra} = 4 \text{ x } 2{,}5\text{m/s} = 10\text{m/s}$$

Considerações Finais

O fator de velocidade F_v é uma relação muito simples entre as velocidades do vento na entrada e na saída em um ambiente fechado. Apesar da simplicidade, o F_v permite prever ou estimar as velocidades do vento no interior de ambientes e em situações onde há pelo menos duas aberturas.

Uma generalização de resultados é que a inversão de sentido do vento inverte F_v. Em outras palavras, se F_v = f, a inversão do vento faz com que F_v =

1/f. Em um exemplo já citado, o vento da porta para a janela era associado à F_v = 4, enquanto o movimento inverso correspondia à F_v = 1/4.

Uma das utilidades da previsão da velocidade do vento é a colocação de mesas e varais de roupa em ambientes residenciais. É interessante colocar mesas longe das aberturas com maior velocidade do vento para evitar que alimentos esfriem rapidamente ou folhas de trabalho sejam espalhadas. Já os varais devem ser colocados próximos aos locais com um vento mais rápido para o favorecimento da secagem das roupas. Os cálculos são bastante simples e a utilidade é ampla.

Este trabalho representa um passo importante na previsão e na estimativa da ventilação em ambientes residenciais. No entanto, ele é apenas uma contribuição para um vasto problema. A única informação dada pelo F_v é a velocidade de saída a partir daquela de entrada. No entanto, o F_v não prevê a direção do vento, logo, não é possível saber por qual das aberturas o vento entrará. A entrada do vento dependerá de fatores externos ao ambiente como o relevo do entorno, a proximidade do mar e de rios, clima, etc. Além disso, o F_v não inclui os efeitos das correntes de convecção, vórtices e atritos tão importantes na ventilação ambiente.

Com uma simples equação da Mecânica dos Fluidos já se chegou à previsão da velocidade do vento de saída. Assim, um estudo mais profundo e rigoroso da Mecânica dos Fluidos abre perspectivas para um entendimento muito mais detalhado e preciso da ventilação em ambientes residenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELATIA, Belal; MARENNE, Christian; SEMIDOR, Catherine. Daylighting strategy for sustainable schools: Case study of prototype classrooms in Libya. **Journal of Sustainable Development.** V. 3, No. 3; September 2010.

BITTENCOURT Leonardo; CANDIDA, Christina. **Ventilação natural em edificações**. Rio de Janeiro: Procel Edifica. 2010. 98 p.

BRAITHWAITE, Jonathan. **An introduction to hydrodynamics.** Bonn, 2011. Disponível em: http://elibrary.bsu.az/books_400/N_224.pdf. Acesso em 09 mai 2019.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 428p.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTIOS - CPTEC. **Ciclone extratropical provoca ventos intensos no Sul**. 2012. Disponível em: https://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22557. Acesso em 15 mai 2019.

FIFE, Paul. **A Gentle Introduction to the Physics and Mathematics of Incompressible Flow Course Notes**. Fall 2000. Disponível em: http://www.math.utah.edu/~fife/gentleb.pdf. Acesso em: 10 mai 2019.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar R**. Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ed. PROCEL/ELETROBRÁS. 2014. 382 p. Disponível em: www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf Acesso em: 15 mai 2019.

MACDOUGH, James M. **Lectures in elementary Fluid Dynamics:** Physics, Mathematics and Applications. Lexington, 2009. Disponível em: http://web.engr.uky.edu/~acfd/me330-lctrs.pdf. Acesso em 02 mai 2019.

NAKAYAMA, Yasuki, BOUCHER, Robert F. **Introduction of Fluid Mechanics.** Great Britain: Butterworth-Heinemann, 1999. 322p.

OLIVEIRA Jr., Amir Antônio Martins. **Mecânica dos Fluidos**. Notas de aula. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2017. Disponível em: https://moodle.ufsc.br/mod/resource/view.php?id=1391896. Acesso em 15 mai 2019.

RITTER, Viviane M. **Avaliação das condições de conforto térmico, lumínico e acústico no ambiente escolar, no período de inverno:** O Caso do Câmpus Pelotas Visconde da Graça**.** Pelotas. 2014. 181 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas. 2014. Disponível em: http://prograu.ufpel.edu.br/uploads/biblioteca/dissertacao_viviane_ ritter_2014.pdf. Acesso em 10 mai 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The right to health indoor air**. 2000. Disponível em: www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/.../E69828.pdf. Acesso em 15 mai 2019.

LEONARDO SIOUFI FAGUNDES DOS SANTOS
Físico, Dr. Física
Professor Adjunto III de Física da UNIFESP, campus Diadema.
Coordenador do Portal Píon da Sociedade Brasileira de Física
http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/
Criador do Blog Quente e Calculista
www.quentecalculista.blogspot.com
e-mail: leosioufi@gmail.com

MARIA DE FATIMA FERREIRA NETO
Física, Drª. Engenharia Civil
Professora Titular na Universidade Paulista
Responsável técnica na Apoio Acústico ltda.
e-mail: fatimafneto@hotmail.com