

ESTUDO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM TÚNEL DE VENTO PARA UM SISTEMA DE FACHADAS MODULAR

**Helenice M. Sacht (1); Luis Bragança (2) Manuela Almeida (3) Edson Matsumoto(4)
Rosana Caram (5)**

- (1) Doutora, Docente de Engenharia Civil de Infraestrutura, helenice.sacht@unila.edu.br, Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, Foz do Iguaçu-PR
- (2) Doutor, Docente do Departamento de Engenharia Civil, braganca@civil.uminho.pt, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães-Portugal
- (3) Doutora, Docente do Departamento de Engenharia Civil, malmeida@civil.uminho.pt, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães-Portugal
- (4) Doutor, Pesquisador Colaborador, edson.mensagem@gmail.com, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC, UNICAMP, Campinas-SP
- (5) Doutora, Docente do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU), rcaram@sc.usp.br, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP

RESUMO

Os ensaios em túnel de vento são uma ferramenta confiável para determinar o efeito da ventilação natural em edifícios. Por meio do presente estudo são analisadas as condições de ventilação de um modelo, de acordo com o posicionamento de módulos de ventilação num sistema de fachadas. Os ensaios foram realizados em túnel de vento, variando a posição dos módulos de ventilação na configuração fachada. Os casos apresentados serão dois, um deles com seis módulos de ventilação posicionados no peitoril da janela (peitoril ventilado) e outro com três módulos de ventilação posicionados acima e abaixo na fachada. Trata-se de um sistema de fachadas móvel e intercambiável, de forma que o mesmo modelo básico fosse utilizado para testar as diferentes possibilidades de ventilação. Medições da velocidade do ar foram obtidas para o interior e exterior do modelo para as diferentes configurações de fachadas, de modo a avaliar o melhor desempenho em relação à ventilação natural. Casos com e sem ventilação cruzada foram considerados para medição da velocidade do ar. Os resultados indicaram que o uso de módulos de ventilação posicionados abaixo do peitoril da janela, formando um peitoril ventilado foi a melhor solução em termos de ventilação natural.

Palavras-chave: Ventilação natural, Túnel de vento, Módulos de ventilação, Sistema de fachadas modular.

ABSTRACT

Wind tunnel tests are a reliable tool to determine the effect of natural ventilation on buildings. This paper discusses the ventilation conditions of a model, according to the ventilation modules positioning in a façade system. Tests were carried out in a wind tunnel, varying the position of the ventilation modules in the façade configuration. Cases presented were two, one with six ventilation modules positioned below the window-sill (ventilated window-sill), and another with three ventilation modules positioned above and below the façade. The façade system proposed was movable and interchangeable so that the same basic model could be used to test the possibilities for ventilation. Air speed measurements were taken inside and outside the model for the different façade configurations to evaluate the best performance in relation to natural ventilation. Single-sided and cross ventilation were considered for air speed measurements. Results show use of six ventilation modules positioned below the window-sill, forming a “ventilated window-sill” was the best solution in terms of natural ventilation.

Keywords: Natural ventilation, Wind tunnel, Ventilation modules, Modular façade system

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural é determinante para o conforto térmico, e conseqüentemente para a saúde e o bem-estar dos ocupantes das edificações. Suas funções são renovar o ar, dispersar poluentes e odores, e proporcionar o conforto térmico do usuário. Ainda, promover troca térmica preventiva no interior do edifício, aquecendo ou resfriando a massa térmica. Depende de fatores fixos, tais como: a disposição do edifício; as condições do entorno; a existência de obstáculos; a implantação e localização do edifício; a orientação; a forma e características construtivas; a posição, tamanho e tipo de aberturas. Os fatores variáveis da ventilação são a direção, a velocidade e a frequência dos ventos (TOLEDO, 2001) e, além disso, a diferença de temperatura entre o interior e exterior.

Os ensaios em túnel de vento constituem uma ferramenta confiável para determinar a influência da ventilação natural na edificação. A ventilação natural renova o ar de um recinto fechado sem utilizar elementos mecânicos, com isso pode-se economizar a energia consumida por sistemas de ar condicionado de ar em um edifício e, além disso, prover qualidade de ar no ambiente.

Em um túnel de vento, a velocidade e a direção do vento são controladas e modelos de pequenas dimensões são utilizados para simular os edifícios naturalmente ventilados. Existem alguns trabalhos nessa área em termos de medições da velocidade, pressão e taxa de renovação para analisar as características de ventilação cruzada (MURAKAMI *et al.*, 1991). Outros trabalhos utilizam fumaça colorida para visualizar as correntes de ar causadas pela ventilação (CHOINIERE & MUNROE, 1991). O trabalho realizado por Jiang *et al.* (2003), por exemplo, apresenta uma comparação de resultados obtidos de ensaios em túnel de vento e de simulações numéricas de corrente de ar. Tais simulações também podem ser consideradas para permitir o estudo de ventilação natural em edifícios.

Os ensaios em túnel de vento realizados com modelos a escala reduzida são importantes para: aumentar a confiabilidade e a efetividade da construção e, também, reduzir os custos de projetos; permitir a avaliação da influência de outras edificações e coberturas do solo próximas sobre a construção analisada; avaliar a qualidade do ar interior em relação à dispersão de poluentes e contaminantes; permitir um estudo mais eficiente sobre a ventilação dos ambientes internos e, portanto, otimizar a distribuição dos espaços para o melhor conforto ambiental, como no presente caso estudado. Além disso, nesse tipo de ensaios, pode-se, por exemplo, estudar casos como: ventilação direta e ventilação cruzada com a abertura posicionada a barlavento ou a sotavento; e o posicionamento da abertura em relação ao vento (se está posicionada à direção normal ou paralela em relação ao fluxo de ventilação).

Na literatura, os diversos métodos simplificados existentes para o cálculo da ventilação natural em edificações empregam algumas das variáveis, como as dimensões das aberturas, localização, velocidade do vento, coeficientes de pressão interna e externa, temperaturas, coeficientes determinados empiricamente, etc. (MATSUMOTO, 2008).

Em termos de velocidades internas, Olgyay (1998) e Evans (1957) salientam que velocidades do ar até 0,25m/s são imperceptíveis, não ocasionando sensação de resfriamento nos usuários. Para os autores, valores de velocidade entre 0,25 e 0,50m/s são agradáveis e proporcionam sensação de frescor. Evans e Schiller (1994) salientam que valores até 0,5m/s não possuem efeito de resfriamento, sendo que acima desse valor que surge um movimento perceptivo para efeito de resfriamento. Ainda segundo Evans (1957), quando a velocidade do ar é de 0,25m/s e 0,50m/s ocorre um resfriamento de 0,7 °C e 1,2 °C, respectivamente (LUKIANCHUKI, 2010).

O trabalho de Candido *et al.* (2015), por exemplo, teve como objetivo investigar a aplicabilidade dos limites dados para a velocidade do ar pelas normas ASHRAE 55 (2004) e ISO 7730 (2005) com os resultados de preferência e aceitabilidade do movimento do ar obtidos em experimentos de campo no clima quente e úmido de Maceió/AL. Os resultados indicam que ambas as normas especificam valores para a velocidade do ar inferiores aos desejados pelos usuários dos ambientes aqui investigados. Os resultados para a preferência do movimento do ar indicam que significativa percentagem dos usuários demanda “maior movimento do ar”, sendo os valores para “menor velocidade do ar” bastante inferiores.

A velocidade do ar necessário para o conforto é baseada nos itens relacionados às condições de saúde dos usuários, como o fornecimento de oxigênio e remoção de contaminantes. A máxima velocidade do ar interior é definida por fatores que vão além do conforto fisiológico, depende também do tipo de edifício e uso. Para escritórios e espaços comerciais, o limite é de 0,8 m/s, para espaços industriais 1,5m/s são aceitáveis, para auxiliar na remoção de substâncias tóxicas, calor ou outras condições prejudiciais. Já para edifícios residenciais a máxima velocidade do ar interior recomendada é de 1m/s (MILITARY HANDBOOK, 1990).

A definição das características do modelo em escala é de fundamental importância para o sucesso de ensaios em túnel de vento. Para que se possa estender os resultados de um experimento para outra situação é

necessário saber se o fenômeno observado no modelo em escala e o que ocorre no protótipo (o edifício real) são equivalentes, ou seja, se as regras da física e as condições de contorno são similares. O modelo e o edifício não são iguais, porém a relação entre as partes, no caso a relação altura/comprimento, permite que se reconheça o protótipo no modelo e vice-versa (CÓSTOLA, 2006).

2. OBJETIVO

O presente estudo analisa as condições de ventilação de um modelo. Foram realizados ensaios em túnel de vento para avaliar a influência do posicionamento de módulos de ventilação nas condições de ventilação natural para um sistema de fachada modular. O posicionamento de módulos foi variado, resultando em duas configurações diferentes de fachadas que foram avaliadas em relação às velocidades do ar em pontos no interior e exterior de um modelo.

3. MÉTODO

Para explicar o desenvolvimento da presente pesquisa serão apresentadas as características do túnel de vento utilizado, do modelo confeccionado para os ensaios e sobre o posicionamento dos sensores no interior e exterior do modelo.

3.1. Túnel de vento

O túnel de vento de camada limite atmosférica instalado no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LaCAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP foi utilizado na presente pesquisa e funciona com um ventilador axial succionando o ar. As Figuras 1 e 2 apresentam respectivamente uma vista do exterior do ventilador axial do túnel de vento e a vista posterior composta pela placa simuladora de turbulência.



Figura 1. Túnel de vento - UNICAMP.

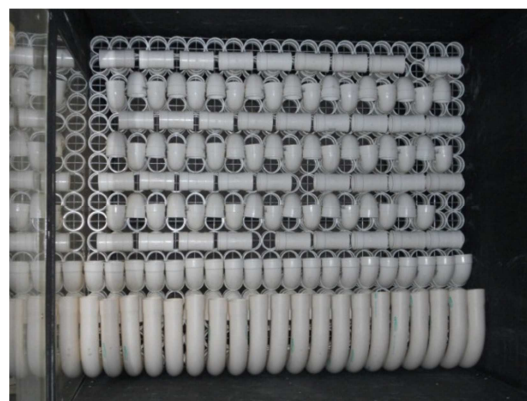


Figura 2. Vista Posterior da placa composta por tubos de PVC para simular a turbulência, próximo à entrada de ar do túnel de vento.

O túnel de vento da UNICAMP possui seção transversal da câmara de ensaios com dimensões de 0,9m de largura por 0,8m de altura, com uma área de 0,72m². No interior do túnel de vento, a turbulência é gerada por meio de uma superfície rugosa e gradiente de pressão nula, devido à necessidade de gerar uma camada limite turbulenta. O crescimento da camada limite deve ser acelerado artificialmente com dispositivos posicionados no interior do túnel.

3.3. Confeção do modelo

Como as dimensões da seção de ensaio do túnel de vento são de 0,9m de largura por 0,8m de altura, totalizando uma área da seção transversal de 0,72m², a taxa de obstrução da seção de ensaio recomendada é de até 5%, aceitável até 7%. Portanto, o modelo ensaiado deve obstruir até 7% desta área, ou seja, a área frontal, perpendicular ao vento, deve ter no máximo 0,05m². Já na direção horizontal ao longo do túnel, não há restrições de dimensões.

Deste modo, o modelo foi construído na escala 1:20, com dimensões de 0,16m de altura, 0,28m de largura e 0,28m de comprimento e área frontal é de 0,045m². Sendo assim, a obstrução da seção transversal de ensaio será de 6,3%. A Tabela 1 apresenta as dimensões em tamanho real e no modelo.

Tabela 1 - Dimensões do Modelo

Medidas	Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)
Altura	3,20	0,16
Largura	5,65	0,28
Comprimento	5,65	0,28
Escala		1:20
Área da secção de ensaio (m ²)		0,72
Área frontal do modelo (m ²)		0,045
Obstrução da secção de ensaio (%)		6,3

Após definido o modelo de ensaio e a escala a ser utilizada, todas as partes foram planificadas no software gráfico AutoCAD. Tais planificações serviram de molde para a confecção da célula principal. O modelo foi constituído por dois tipos de materiais: papel madeira e acrílico. O modelo em si (célula) destinada aos ensaios foi confeccionada em papel madeira com espessuras de 1, 2 e 3mm unidas por cola branca PVA, dando origem a uma parede com espessura usual em Portugal (36cm), pois o presente trabalho foi desenvolvido no referido país (Figuras 3 e 4) (SACHT, 2013). Portanto, o modelo em questão foi executado em Portugal e ensaiado no Brasil, seguindo uma escala de 1:20 e de forma que as espessuras de paredes e lajes correspondessem o mais próximo possível das normalmente empregadas em Portugal.

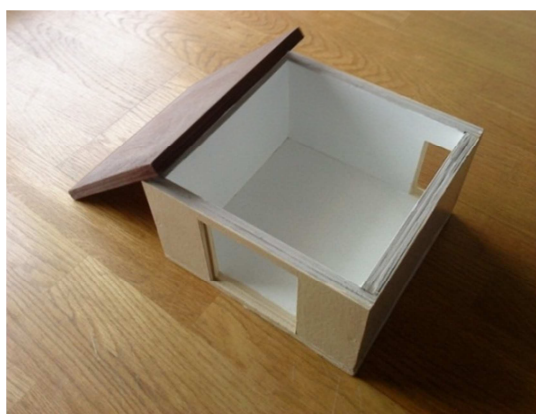


Figura 3. Modelo.



Figura 4. Detalhe da camada interna dos vãos destinados à fachada e à porta.

Posteriormente, as peças em acrílico (variações de fachadas com 2mm de espessura e 2,5mx2,5m) foram cortadas no Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção (LAPAC), da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP (Figura 5). Em seguida foi montada cada configuração proposta para o ensaio, com todos os detalhes necessários. Para o encaixe das variações de fachadas no modelo foi previsto um vão de 2,50 x 2,50m como apresentado na Figura 4.



Figura 5. Uma das placas com os protótipos das

fachadas cortados.

As fachadas propostas são móveis e substituíveis, de forma a aproveitar o mesmo modelo base para testar as possibilidades de ventilação. Foram construídas quatro variações de fachadas, cujas características serão apresentadas a seguir. Cada módulo de ventilação possui dimensão de 0,50 x 0,50m. As fachadas em acrílico foram fixadas no modelo por meio de fita dupla face de alta aderência.

Os casos apresentados serão dois: um deles com seis módulos de ventilação posicionados abaixo do peitoril da janela (peitoril ventilado) (Caso 01A); e três módulos de ventilação posicionados acima e três abaixo da fachada (01B). Cada um desses casos foi ensaiado duas vezes, considerando-se a porta para a saída de ventilação aberta ou fechada. Em relação ao tipo de grelha do módulo de ventilação, a mesma apresenta elementos posicionados na vertical, de acordo com as imagens da Figura 6a-b.



Figura 6a–b. Detalhe do tipo de grelha do módulo de ventilação para os casos 01A e 01B.

O esquema da Figura 7 apresenta o modelo base e as duas fachadas em acrílico simuladas.

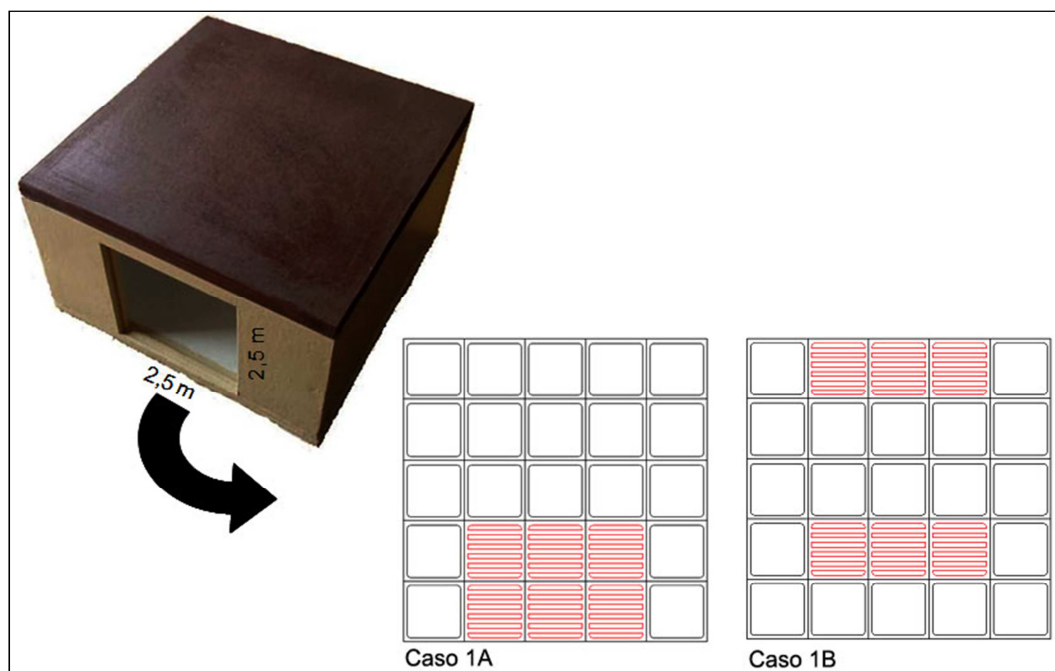


Figura 7. Esquema apresentando o modelo e casos de ventilação analisados.

3.4. Posicionamento dos sensores

No interior do modelo, a direção e a velocidade do ar foram determinadas através da utilização de um anemômetro de fio quente, em três pontos. Os sensores do anemômetro de fio quente foram posicionados no

interior nos pontos definidos através de furos na base do modelo, que foram conectados ao módulo de aquisição de dados. A aquisição de dados possui seis sensores com leituras simultâneas, sendo esse número o máximo possível de pontos para fazer a leitura das velocidades.

Para a medição das velocidades internas do modelo no túnel de vento, foram instalados três sensores miniaturas do anemômetro de fio quente no interior, através de furos na parte inferior. Um sensor foi posicionado no ponto central, e os restantes nas extremidades, afastados a 1m de um dos vértices e outro próximo à saída de ar. Os sensores internos (P2, P3 e P4) foram posicionados a uma altura de 0.80m a partir do piso na escala de 1/20, altura do corpo do correspondente a uma pessoa sentada (Figura 8).

Na fachada principal do modelo foi instalado um sensor (P1) com o propósito de medir a velocidade do vento externo antes de atingir o modelo físico. Tal sensor foi localizado na fachada frontal com alturas coincidindo com o ponto médio da fachada ($h=1.55\text{m}$) (Figura 9), a uma distância de 6m, de forma a obter o valor do escoamento não perturbado. Foi considerada para os ensaios a incidência do vento perpendicular à fachada principal. Além disso, foram instalados dois sensores externos na abertura de saída do ar (porta) (P5 e P6), de forma a obter as velocidades de vento ao deixar o modelo. Esses sensores foram posicionados à altura de 1.00m e 1,70m respectivamente a partir da base do modelo, que correspondem à divisão da altura total da abertura (porta) em três partes. Tais pontos de medição foram importantes para permitir calcular os dados para obtenção da relação entre as velocidades. A frequência de rotação do ventilador do túnel de vento está relacionada com a velocidade do vento em cada ensaio (velocidades obtidas com o sensor na posição P1).

As aberturas configuradas pela entrada de ar (fachada) e saída de ar (porta) foram dispostas de forma a proporcionar ventilação cruzada quando abertas, sendo o posicionamento da porta em uma das extremidades das paredes usual em Portugal, assim como no Brasil. A posição dos sensores é oposta a porta de saída de forma a não coincidir com o sensor externo e, além disso, essa disposição permite o estudo de um ponto que se encontra em uma posição crítica (P4).

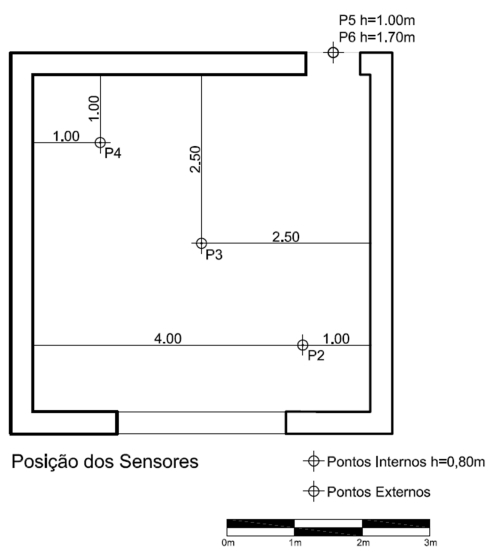


Figura 8. Posicionamento dos sensores no interior do modelo.

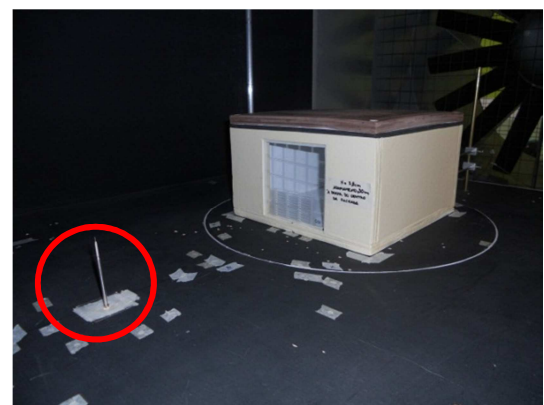


Figura 9. Modelo posicionado no interior do túnel de vento e sensor externo.

4. RESULTADOS

Serão apresentados os resultados dos ensaios em túnel de vento, nos quais foram realizadas medições para comparar as velocidades das duas variações de fachadas estudadas, de forma a determinar qual delas apresenta o melhor desempenho em relação à ventilação natural. Foram quantificadas as velocidades internas e externas.

Os resultados quantitativos são representados pelos valores das velocidades nos pontos escolhidos ($V1=$ Velocidade no P1; $V2=$ Velocidade no P2; $V3=$ Velocidade no P3; $V4=$ Velocidade no P4; $V5=$ Velocidade no P5; $V6=$ Velocidade no P6), sendo eles:

A análise dos resultados dos ensaios foi realizada por meio da comparação entre a velocidade de incidência do vento próximo da fachada e as velocidades internas, a fim de determinar a configuração que proporciona as melhores condições de ventilação.

Primeiramente são apresentados nas Tabelas 2 e 3 os valores da velocidade média do ar determinados nos pontos verificados no modelo descrito anteriormente (Três pontos internos e três externos, sendo um na entrada do ar e dois na saída), de acordo com a configuração de fachada.

Em relação às composições de fachadas analisadas apresentadas na metodologia tem-se:

- Caso 01A: Fachada com seis módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na vertical, sendo 1A A= Caso 01A com ventilação cruzada e 1A F= Caso 01A sem ventilação cruzada;
- Caso 01B: Fachada com três módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior da fachada, com elementos da grelha posicionados na vertical, sendo 1B A= Caso 01A com ventilação cruzada e 1B F= Caso 01B sem ventilação cruzada.

Em relação às velocidades medidas no interior e exterior do modelo, tem-se:

- V1= Velocidade no ponto P1 a 6m da fachada e 1.55m de altura;
- V2= Velocidade no ponto P2, na extremidade a 0.80m de altura;
- V3= Velocidade no ponto central P3 do modelo a 0.80m de altura;
- V4= Velocidade no ponto P4, na extremidade a 0.80m de altura;
- V5= Velocidade no ponto P5, na saída de ar (porta) a 1.00m de altura;
- V6= Velocidade no ponto P6, na saída de ar (porta) a 1.70m de altura.

Tabela 2 - Caso 01A: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência (m/s).

Frequência (Hz)	Velocidades Médias por Frequência											
	V1		V2		V3		V4		V5		V6	
	1A A	1A F	1A A	1A F	1A A	1A F	1A A	1A F	1A A	1A F	1A A	1A F
3	1,67	1,24	0,61	0,59	0,78	0,59	0,64	0,57	0,84	-	0,94	-
5	2,39	2,42	0,65	0,59	0,98	0,59	0,79	0,57	1,29	-	1,49	-
7	3,91	3,38	0,81	0,59	1,88	0,59	1,12	0,57	2,10	-	2,25	-
9	5,33	4,83	1,14	0,59	2,63	0,60	1,35	0,57	2,82	-	2,94	-
11	6,05	5,97	1,53	0,60	2,88	0,61	1,44	0,58	3,23	-	3,35	-
13	7,06	7,20	1,64	0,60	3,41	0,64	1,76	0,58	3,81	-	3,94	-

Caso 01A: Fachada com seis módulos de ventilação (tipo peitoril ventilado) com elementos da grelha posicionados na vertical;

1AA= Caso 01A com ventilação cruzada;

1AF= Caso 01A sem ventilação cruzada

Tabela 3. Caso 01B: Com e sem ventilação cruzada - Velocidades Médias por Frequência (m/s).

Frequência (Hz)	Velocidades Médias por Frequência											
	V1		V2		V3		V4		V5		V6	
	1B A	1B F	1B A	1B F	1B A	1B F	1B A	1B F	1B A	1B F	1B A	1B F
3	1,48	1,44	0,64	0,59	0,74	0,59	0,59	0,57	0,78	-	0,90	-
5	2,44	2,26	0,69	0,59	0,85	0,59	0,67	0,58	1,28	-	1,52	-
7	3,63	3,78	0,86	0,60	1,41	0,60	0,72	0,58	1,91	-	2,19	-
9	5,51	5,48	1,10	0,60	2,15	0,61	0,85	0,59	2,75	-	3,06	-
11	5,34	4,96	1,37	0,61	1,83	0,61	0,89	0,59	2,87	-	3,26	-
13	7,41	6,74	1,46	0,62	2,66	0,64	1,13	0,60	3,87	-	4,29	-

Caso 01B: Fachada com três módulos de ventilação posicionados na parte superior e inferior, com elementos da grelha posicionados na vertical;

1BA= Caso 01A com ventilação cruzada;

1BF= Caso 01B sem ventilação cruzada.

Foram elaborados, para melhor análise dos dados, gráficos que apresentam as velocidades do ar no interior e exterior do modelo estudado em função da velocidade a 6m da fachada e altura de 1.55m (V1) (Figura 9 a 12). Observa-se em boa parte nos casos analisados, uma tendência linear na variação da

velocidade nos pontos medidos. Os maiores valores nas velocidades foram observados para os pontos medidos no exterior do modelo, posicionados na porta de saída de ar (P5 e P6), sendo que no caso 01A os valores medidos em tais pontos são praticamente os mesmos (Figuras 10 e 11).

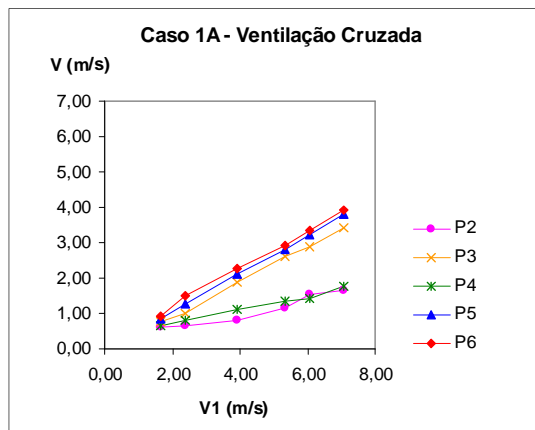


Figura 10. Caso 1A com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).

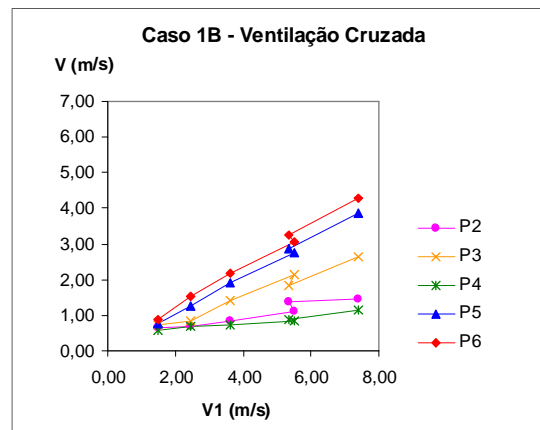


Figura 11. Caso 1B com ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).

A partir da análise dos dados sem ventilação cruzada, ou seja, com a porta existente no modelo fechada, foram observados praticamente os mesmos resultados para as duas configurações de fachada. Isso comprova que, para um ambiente que não possui ventilação cruzada, não é possível obter uma ventilação natural satisfatória. Pode ser que com o uso de outros tipos de elementos na fachada, como um anteparo vertical, por exemplo, o fluxo de ar possa ser direcionado na entrada e as velocidades internas apresentem um pequeno aumento, porém, ainda assim a existência de ventilação cruzada seria o ideal (Figuras 12 e 13).

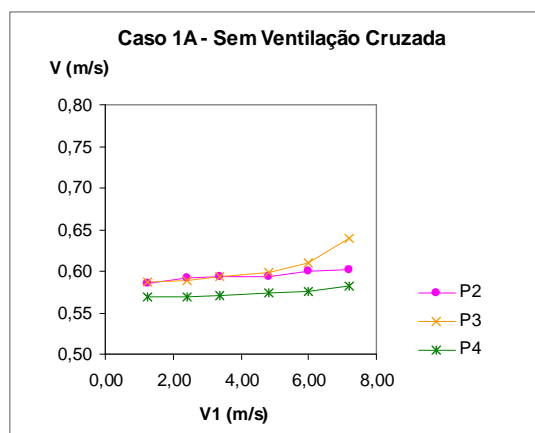


Figura 12. Caso 1A sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).

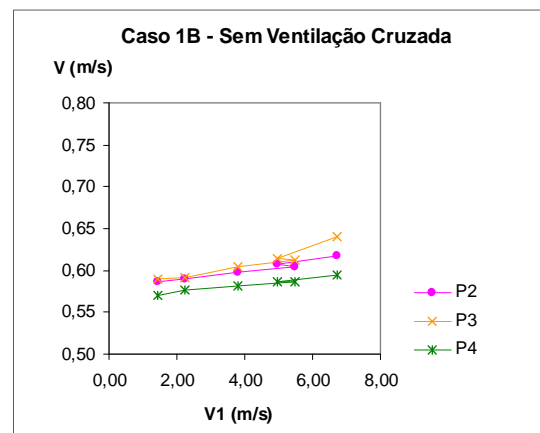


Figura 13. Caso 1B sem ventilação cruzada: Velocidades nos pontos internos e velocidade na fachada (V1).

Para estes casos, que apresentam os módulos de ventilação com elementos da grelha de ventilação verticais (1A e 1B), a área de abertura efetiva na fachada foi de $0,61\text{m}^2$ e a área da porta (abertura de saída do ar) foi $1,45\text{m}^2$, assim, a área da saída de ar é maior do que a entrada. Segundo estudos (GIVONI, 1976; CHÁVEZ, FREIXANET, 1995), quanto maior for o tamanho da abertura de saída de ar, em comparação com a de entrada, maior será a velocidade adquirida, isso pode explicar o fato das velocidades serem maiores nos pontos posicionados na porta de saída de ar (P5 e P6).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios em túnel de vento foi observado que a melhor configuração da fachada em termos de ventilação natural foi o peitoril ventilado. Esta solução apresentou melhores resultados do que o uso de módulos de ventilação posicionados separadamente acima e abaixo na fachada.

Observou-se que o caso da fachada com aberturas somente na parte inferior apresentou velocidades maiores no interior do ambiente, quando comparadas com o caso da fachada com aberturas inferiores e

superiores. Nos dois casos, a vazão de ar é a mesma, porque as áreas de entrada e de saída são iguais. Porém, como todo o fluxo de ar é insuflado para o interior do ambiente na altura do usuário, para o caso da fachada com aberturas na parte inferior, a velocidade no interior é maior do que para o caso da fachada com aberturas inferior e superior. Isto ocorre porque parte da vazão de ar é insuflado por cima e não proporciona boa ventilação na altura do usuário. Portanto, a ventilação cruzada utilizando somente aberturas na parte inferior proporciona uma maior velocidade e melhor distribuição de ar no interior do ambiente na altura do usuário. Para casos com aberturas em apenas uma das fachadas (sem ventilação cruzada), a velocidade de ventilação é baixa, independentemente do tipo de solução. Provavelmente, a velocidade média do ar interior não sofrerá mudanças significativas com o aumento do tamanho da abertura de entrada para os casos sem ventilação cruzada. Estes resultados comprovam a necessidade de aberturas opostas ou adjacentes para possibilitar melhor desempenho em termos de ventilação natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CANDIDO, C.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L.; DE DEAR, R. Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 4, 2010.
- CHÁVEZ, J. R. G.; FREIXANET, V. F. Viento y arquitectura: el viento como factor de diseño arquitectónico. México: Trillas, 196 p. 1995.
- CHOINIERE, Y.; MUNROE, J.A. A wind-tunnel study of wind direction effects on air-flow patterns in naturally ventilated swine buildings. *Canad. Agric. Eng.* 36 (2), 1994. pp 93–101.
- CÓSTOLA, D. *Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- EVANS, B.H. *Natural Air Flow Around Buildings*. Texas Engineering Experiment Station Research Report No. 59, Texas A.& M. College, College Station, TX. 1957.
- EVANS, J. M.; SCHILLER, S. *Diseño bioambiental y arquitectura solar*. 3. ed. Buenos Aires: UBA, 1994.
- GIVONI B. *Man, Climate & Architecture*. 2nd Edition, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1976.
- JIANG, Y; ALEXANDER, D.; JENKINS, H.; ARTHUR, R.; CHEN, Q. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, n. 91. 331–353. Elsevier, 2003.
- LUKIANCHUKI. M. A. *A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Filgueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2010.
- MATSUMOTO, E. *Calibração do túnel de vento de camada limite atmosférica e ensaios de aberturas em edificações utilizando modelos reduzidos*. Projeto de Pesquisa Pós-Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo-FEC, Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP. Campinas. 2008.
- MILITARY HANDBOOK (MIL-HDBK). *Cooling Buildings by Natural Ventilation*. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command. Alexandria, USA. 1990.
- MURAKAMI, S.; KATO, S.; AKABAYASHI, S.; MIZUTANI, K.; KIM, Y. D. *Wind tunnel test on velocity–pressure field of cross-ventilation with open windows*. ASHRAE Trans. 97 (Part 1), pp 525–538. 1991.
- TOLEDO, A. Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios. In: Anais do VI Encontro Nacional e III Latino-americano sobre Conforto no ambiente Construído, CD-ROM, Roriz, M. e Labaki, L. C. (ed.)/ANTAC. São Paulo, 2001.
- OLGYAY, V. *Arquitectura y Clima: Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili. 1998.
- SACHT. H. M. *Módulos de Fachada para Reabilitação Eco-Eficiente de Edifícios*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, Guimarães. 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo programa Erasmus Mundus ISAC – *Improving Skills Across Continents* à presente pesquisa.