

# ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL: SIMULAÇÕES CFD E ENSAIOS EM UM MODELO FÍSICO REDUZIDO

## *NATURAL VENTILATION ANALYSIS: CFD SIMULATIONS AND SIMPLIFIED TESTS IN A REDUCED PHYSICAL MODEL*

Camila Pizaia Bevilaqua<sup>1</sup>

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil, [cahpizaia@hotmail.com](mailto:cahpizaia@hotmail.com)

Bianca Bressianini<sup>2</sup>

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil, [bianca\\_b@hotmail.com](mailto:bianca_b@hotmail.com)

Maurício Hidemi Azuma<sup>3</sup>

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil, [mhazuma@uem.br](mailto:mhazuma@uem.br)

Marieli Azoia Lukiantchuki<sup>4</sup>

Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil, [malukiantchuki2@uem.br](mailto:malukiantchuki2@uem.br)

### Resumo

Apesar das inúmeras vantagens da integração dos conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico, estudos demonstram que para a maioria dos arquitetos existe uma dificuldade em sua real aplicação. Isso indica a existência de uma lacuna entre o conhecimento acadêmico e a prática de projeto, principalmente no que se refere à ventilação natural. Muitas das estratégias de ventilação natural são apresentadas por meio de desenhos visionários que não representam claramente o seu desempenho nos ambientes internos. O objetivo dessa pesquisa é comprovar a materialização de princípios básicos de ventilação natural por meio de um método simplificado, visando facilitar o entendimento desses fenômenos pelos alunos durante o ensino da ventilação natural e, posteriormente, sua aplicação no projeto arquitetônico. O estudo comparativo dividiu-se em três etapas a fim de comprovar a eficiência do modelo proposto para uso no processo de ensino: (i) construção de um modelo físico flexível e simplificado para uso no ensino da ventilação natural; (ii) ensaios experimentais no modelo proposto, com relação ao impacto da localização das aberturas no desempenho do fluxo de ar interno nas edificações; (iii) simulações computacionais com base na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) dos mesmos cenários avaliados pelo método simplificado. A comparação dos resultados experimentais e numéricos demonstrou uma compatibilidade entre as duas ferramentas utilizadas, mostrando que é possível o uso desse modelo simplificado para o ensino de princípios básicos da ventilação natural como, por exemplo, a definição da localização das aberturas.

Palavras-chave: Ventilação natural. Modelo físico reduzido. Simulação CFD. Projeto arquitetônico. Processo de ensino.

### Abstract

Despite the many advantages of integrating bioclimatic concepts into architectural design, studies show that for most architects their actual application is difficult. This indicates the existence of a gap between academic knowledge and design practice, especially concerning natural ventilation. Many of the natural ventilation strategies are presented employing visionary designs that do not represent their performance indoors. The objective of this research is to verify the materialization of basic principles of natural ventilation through a simplified method, aiming to facilitate the understanding of these phenomena by students during the teaching of natural ventilation in universities and, later, its application in the architectural design. The methodology was divided into three stages. 1. Construction of a flexible and simplified physical model for use in natural ventilation teaching; 2. Experimental tests in the proposed model, regarding the impact of the location of the openings on the performance of the indoor airflow in buildings; 3. Computational simulations based on computational fluid dynamics (CFD) of the same scenarios evaluated by the simplified method, in order to prove the efficiency of the proposed model for educational use in. The experimental and numerical results verified compatibility between the two tools, showing that it is possible to use this simplified model for understanding basic principles of natural ventilation such as, for example, the definition of the location of openings.

Keywords: Natural ventilation. Reduced physical model. CFD simulation. Architectural Project. Education Process.

---

How to cite this article:

BEVILAQUA, C. P.; BRESSIANINI, B.; AZUMA, M. H.; LUKIANTCHUKI, M. A. Análise da ventilação natural: simulações CFD e ensaios em um modelo físico reduzido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019022, 30 maio 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8652835>

---

Received in 30.06.2018 - accepted in 07.04.2019 – published in 30.05.2019

e019022-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 10, p. e01922, 2019, ISSN 1980-6809

## Introdução

A integração dos aspectos bioclimáticos por meio de estratégias passivas de conforto possui um alto potencial de conservação de energia, demonstrando que o ideal são soluções que minimizem ou até eliminem o esgotamento dos recursos naturais (EDWARDS; HYETT, 2005). A crise do petróleo e as preocupações ambientais relacionadas à exploração dos recursos naturais da década de 70 despertaram a atenção para temas como a eficiência energética. De acordo com Trebilcock (2007), a grande consciência que esse impacto causou no planeta gerou um crescimento, entre os arquitetos, da necessidade de integrar esses assuntos nos projetos. No entanto, apesar de todas as vantagens da integração dos conceitos bioclimáticos aos edifícios, Maciel (2006) destaca que existe uma dificuldade em sua real aplicação. Segundo a autora, todo o avanço no campo da bioclimatologia e da eficiência energética não demonstrou uma influência eficaz sobre as práticas de projeto dos arquitetos.

É de conhecimento comum as dificuldades existentes em transferir o conhecimento tecnológico e científico para a prática profissional. Isso pode ser enfatizado quando se trata do conforto ambiental que, na maioria das vezes, é direcionado para segundo plano no projeto. De acordo com Kowaltowski et al. (1998), um dos problemas para a incorporação dos conceitos de conforto pelos arquitetos é a dificuldade da representação visual desses fenômenos e sua transposição para os projetos, principalmente com relação à ventilação natural. Isso ocorre pois, muitas vezes, o movimento do ar é representado por meio de flechas, sem a comprovação de sua verdadeira eficácia.

Sobre isso, Kowaltowski et al. (2006) também destacam que, na representação gráfica tradicional do projeto, a tradução dos fenômenos do conforto ainda apresenta grande dificuldade, sendo que as ilustrações são muitas vezes criadas evocando sensações equivocadas e não realistas. Segundo os autores, a visualização de aspectos de conforto ambiental no processo de projeto é um importante instrumento para uma clara transferência desses conhecimentos da teoria para a prática projetual. Para que exista conexão entre os aspectos de conforto, oriundos da pesquisa científica, e as soluções de projeto, é fundamental visualizar os fenômenos por meio de imagens estimulantes ao processo criativo.

Trindade, Pedrini e Duarte (2010) afirmam que, apesar do grande potencial da ventilação natural, existem restrições por parte dos arquitetos, devido à falta de garantia de que esta estratégia gera conforto, ainda mais se comparada com os sistemas de resfriamento artificial. Além disso, algumas ferramentas para a incorporação dessas estratégias no projeto, como as simulações *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e os ensaios no túnel de vento, não são acessíveis devido a sua complexidade, custo elevado, necessidade de conhecimentos específicos e equipes multidisciplinares.

A ventilação natural em regiões tropicais como o Brasil é uma eficiente estratégia de projeto para a obtenção de conforto térmico e para a redução do consumo de energia elétrica. Um dos benefícios da ventilação natural é a redução do consumo de energia, pois minimiza diretamente o uso de sistemas de ventilação mecânica e ar condicionado. Além disso, a ventilação natural torna-se importante também por razões de salubridade dos ambientes e de seus ocupantes, pois permite uma renovação contínua do ar interno de um recinto.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), o Brasil, devido ao seu imenso território e pelo fato de se localizar entre dois trópicos, possui um clima bastante variado. Cândido et al. (2010) destaca que grande parte do território brasileiro é classificado como tendo

um clima quente e úmido. Nestas regiões, a ventilação natural combinada com a proteção solar são as estratégias passivas de projeto mais eficientes para se alcançar o conforto térmico sem o resfriamento mecânico. Segundo Lôbo e Bittencourt (2003) nesse tipo de clima a ventilação pode ser usada para duas finalidades complementares. A primeira é resfriar o edifício, aquecido pela radiação solar e por ganhos internos de calor. A segunda é o resfriamento fisiológico, que se refere às trocas de calor por convecção, quando as correntes de ar estão em contato com o corpo humano.

No entanto, apesar desses aspectos favoráveis, o número de edifícios usando ar condicionado como principal estratégia para o resfriamento tem crescido significativamente (CÂNDIDO *et al.*, 2010). Como muitos arquitetos têm dificuldade em incorporar essas questões nos edifícios, o ar condicionado se torna a principal estratégia para se adquirir conforto térmico, diante da facilidade de sua incorporação.

A fase mais importante para a inclusão dos aspectos de ventilação natural é a concepção do projeto. Soluções incorporadas após a construção são mais dispendiosas e não atendem com a mesma eficiência que as concebidas nos primeiros estágios. Lukiantchuki (2010) estudou o processo de projeto do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé, que é conhecido por incorporar questões de conforto em seus edifícios. Os resultados mostram um processo intuitivo, destacando suas experiências profissionais como principal auxílio para a tomada de decisões, no âmbito do projeto. Maciel (2006) constatou essa mesma questão no processo de projeto de diferentes arquitetos que utilizam e/ou utilizaram o conforto como premissa projetual, como Severiano Porto, Leonardo Salazar Bittencourt, Lelé e Rômulo Bonelli.

Tendo em vista a carência de edifícios com boas soluções de ventilação natural e as dificuldades dos arquitetos integrarem estes aspectos no projeto arquitetônico, buscam-se métodos práticos que facilitem o entendimento desses princípios pelos alunos e, posteriormente, sua incorporação no projeto. Tem-se um grande conhecimento dos fenômenos por meio das bibliografias existentes, mas poucos princípios físicos reais são testados pelos arquitetos com relação à aplicabilidade das soluções nos projetos arquitetônicos. Acredita-se que isso seja a grande dificuldade do aluno, ao tentar incorporar essas questões no projeto arquitetônico.

Assim, despertam-nos as questões: como preencher a lacuna existente entre a teoria e a prática? Como facilitar a integração da ventilação natural no projeto pelos profissionais? Nos estudos de ventilação natural, as ferramentas de alta confiabilidade demandam um elevado custo para aquisição e grande tempo de aprendizado, o que dificulta seu uso para o ensino na graduação, conforme mencionado anteriormente. Assim, nessa pesquisa avaliou-se um método simplificado para o ensino da ventilação natural na graduação, buscando facilitar a tomada de decisão pelos alunos. O objetivo é verificar a materialização dos princípios básicos de ventilação natural por meio de experimentações físicas e visuais com um modelo físico reduzido simplificado, incluindo, posteriormente, simulações CFD de alta complexidade.

## **Método**

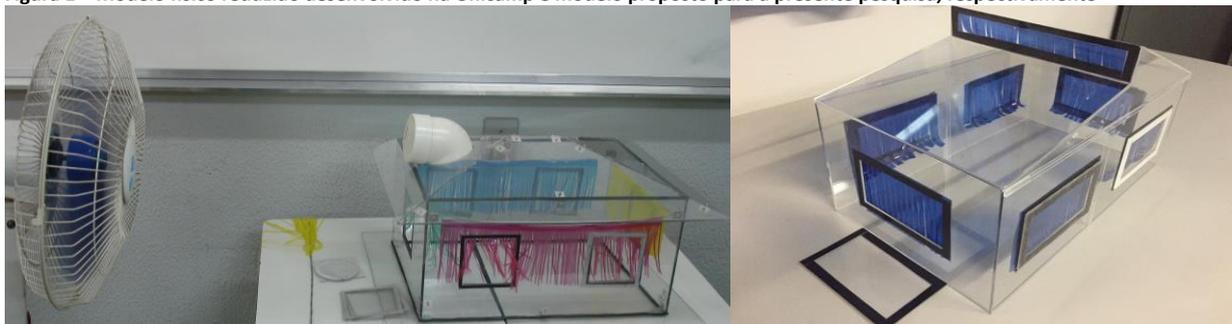
Foi realizada uma pesquisa experimental comparando qualitativamente a influência da localização das aberturas no comportamento do fluxo de ar no ambiente interno entre modelo físico reduzido e simulação em CFD correspondente. O método se dividiu em três etapas: 1. Construção do modelo físico em escala reduzida; 2. ensaios no modelo proposto e 3. simulações com base na Dinâmica dos Fluidos Computacional. Oito configurações de aberturas no modelo físico reduzido foram analisadas de forma simplificada e, posteriormente, comparadas com simulações CFD, a fim de comprovar

a eficiência da visualização do fluxo de ar em modelos simplificados. O entendimento e a aplicação de conhecimentos teóricos relacionados à ventilação natural no projeto arquitetônico pelos alunos são muitas vezes dificultados pela falta de uma visualização mais clara do seu desempenho nas edificações.

### Construção do modelo físico reduzido

O modelo utilizado nessa pesquisa teve como base uma maquete executada em 2008 pelo pesquisador Dr. Edson Matsumoto na Universidade Estadual de Campinas, para estudos simplificados de ventilação natural (LABAKI; MATSUMOTO; CARAM, 2012). Algumas adaptações relacionadas às dimensões e às configurações das aberturas foram realizadas no modelo, conforme a descrição a seguir (Figura 1).

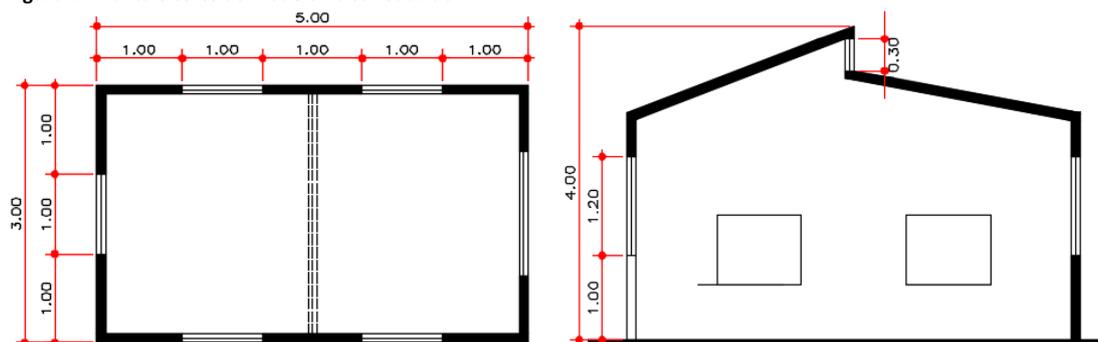
Figura 1 – Modelo físico reduzido desenvolvido na Unicamp e modelo proposto para a presente pesquisa, respectivamente



Fonte: Os autores

Um modelo físico em escala reduzida de um ambiente genérico foi construído para a realização de ensaios simplificados do comportamento do fluxo de ar no espaço interior. As dimensões reais do ambiente são de 3,00 m x 5,00 m x 4,00 m (largura x comprimento x altura). O espaço é composto de quatro janelas de 1,00 m x 1,20 m nas paredes laterais, com peitoril de 1,00 m e uma janela na cobertura de 3,00 m x 0,30 m. O telhado tem duas superfícies inclinadas em 20 %. O modelo foi construído na escala 1:10, apresentando dimensões de 0,30 m x 0,50 m x 0,40 m (Figura 2).

Figura 2 - Planta e corte do modelo físico reduzido



Fonte: Os autores

O modelo foi planejado no software AutoCAD, que posteriormente teve o desenho exportado para o programa operacional de uma cortadora a laser modelo Acrila, na qual foram cortadas as peças. O material utilizado para a maquete foi o acrílico transparente de espessura 3 mm, visando facilitar a visualização dos ensaios e conferir maior resistência ao modelo. As peças foram coladas com adesivo próprio para o material, vedando, desta forma, todas as frestas.

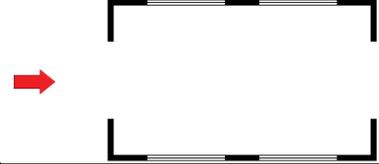
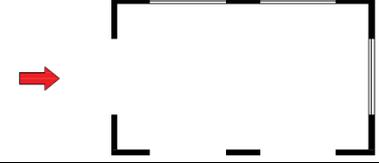
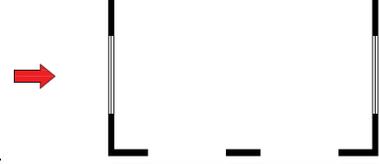
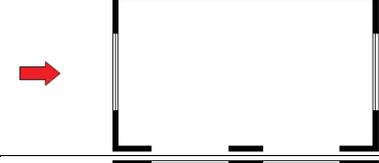
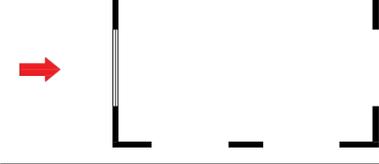
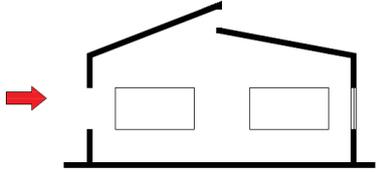
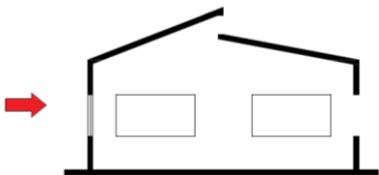
As aberturas foram construídas de maneira flexível: foram fixados ímãs nas bordas das janelas e das peças de fechamento, o que possibilita abrir e fechar as janelas de forma

rápida, dependendo da configuração que se quer avaliar. Em cada abertura foi colocado um plástico colorido, simulando uma cortina, para a visualização da trajetória do fluxo de ar (entrada ou saída de ar) no momento dos ensaios (Figura 1).

*Ensaio experimentais no modelo*

Foram realizados ensaios experimentais simplificados no modelo físico reduzido para analisar qualitativamente a influência da localização das aberturas no comportamento do fluxo de ar interno. Oito configurações de aberturas foram ensaiadas, devido à flexibilidade das janelas do modelo construído, conforme detalhado no Quadro 1.

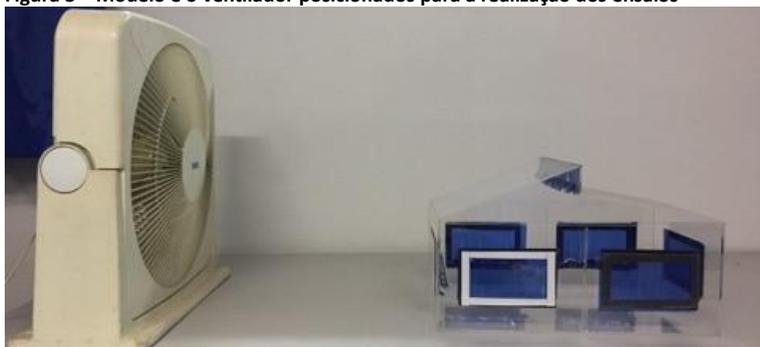
**Quadro 1 – Configurações ensaiadas no modelo experimental**

| Imagem  | Descrição   |
|---|---|
|    | <p><b>CASO UM:</b> ventilação unilateral com apenas uma abertura na fachada a barlavento (sentido dos ventos dominantes).</p>   |
|    | <p><b>CASO DOIS:</b> ventilação cruzada com duas aberturas em fachadas opostas: uma na face a barlavento e outra na face a sotavento (contrário aos ventos dominantes).</p> |
|   | <p><b>CASO TRÊS:</b> ventilação cruzada com aberturas em fachadas adjacentes: uma na face a barlavento e duas na face lateral.</p>  |
|  | <p><b>CASO QUATRO:</b> duas aberturas em cada fachada lateral do edifício – não estão localizadas na face a barlavento</p>  |
|  | <p><b>CASO CINCO:</b> duas aberturas em apenas uma fachada lateral do edifício – não estão localizadas na face a barlavento</p>   |
|  | <p><b>CASO SEIS:</b> duas aberturas na face lateral do edifício – não estão localizadas na face a barlavento - e uma abertura na face a sotavento.</p>                      |
|  | <p><b>CASO SETE:</b> ventilação cruzada vertical com uma abertura na fachada a barlavento e outra na cobertura no sentido a sotavento.</p>                                  |
|  | <p><b>CASO OITO:</b> uma abertura na fachada a sotavento e outra na cobertura também no sentido a sotavento.</p>  |

Fonte: Os autores

Para a execução dos ensaios simplificados é necessário o uso de um ventilador de diâmetro maior que a dimensão lateral da maquete, para simular o efeito do vento tangenciando as faces laterais do edifício. Desse modo, utilizou-se um ventilador com três velocidades de ventilação, de potência 100 v e 0,50 m de diâmetro. O fluxo utilizado foi o médio, pois o mais fraco não movimentava as cortinas adequadamente e o mais forte deixa as cortinas muito desordenadas, dificultando a visualização do fenômeno. O modelo foi posicionado com sua face menor de frente para o ventilador, sendo este localizado a 0,50 m da maquete (Figura 3).

Figura 3 – Modelo e o ventilador posicionados para a realização dos ensaios

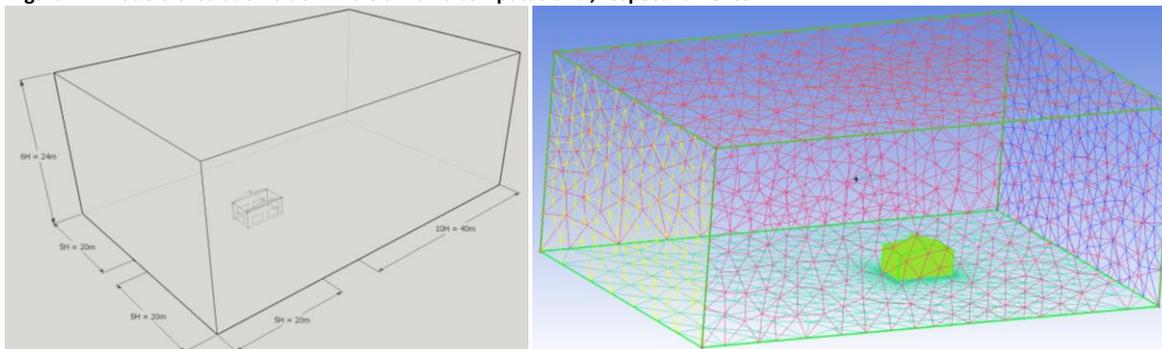


Fonte: Os autores

### Simulações CFD

Para a realização das simulações, utilizou-se o software CFX 12.0. O modelo tridimensional do edifício e do domínio foi construído no software AutoCAD. O domínio, segundo Cóstola (2006), é o volume do espaço para o qual o escoamento será resolvido. A dimensão do domínio deve ser tal que não se faça sentir nas fronteiras a presença do edifício, por isso sua dimensão tem relação com o tamanho do objeto a ser simulado. Ramponi e Blocken (2012) testaram diferentes proporções de domínio e concluíram que em um domínio muito pequeno há tendência de aumento da velocidade local. Optou-se pelo domínio retangular por possibilitar um número menor de elementos na malha e, assim, reduzir o tempo de processamento das simulações. As dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005): distâncias a barlavento e nas laterais = 5H (20,00 m); altura = 6H (24,00 m); e distância a sotavento = 10H (40,00 m); Sendo H = 4,00 m, que corresponde à altura do modelo simulado (Figura 4). A área de obstrução do edifício no domínio foi de 1,1% no sentido do fluxo e de 1,5% no sentido perpendicular ao fluxo, atendendo à sugestão de Cost (2004), que recomenda um valor abaixo de 3%. Assim, evita-se o efeito de blocagem, impedindo que as fronteiras do domínio influenciem no escoamento.

Figura 4 – Modelo ensaiado no domínio e a malha computacional, respectivamente



Fonte: Os autores

Para todas as simulações utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica, cujos parâmetros globais adotados foram: (a) *maximum element size* 16; (b) *natural size* 4; e (c) *cells in gap* 8. A malha foi refinada nas superfícies do edifício em um valor de 0,10 m, a fim de melhorar a visualização do fluxo de ar no espaço interno e no entorno imediato ao edifício (Figura 4). A combinação destes parâmetros determina a quantidade de elementos da malha e o tempo de processamento das simulações. A definição dos parâmetros da malha computacional é um dos estágios mais importantes de uma simulação CFD. Diversos autores (BLOCKEN; STATHOPOULOS; CARMELIET, 2007; CALAUTIT; HUGHES, 2014; CÓSTOLA; ALUCCI, 2007) ressaltam que a precisão dos resultados é dependente desse fator, e que apresenta implicações igualmente importantes na convergência do modelo.

As condições do domínio foram definidas como: (a) entrada como *Inlet* e saída como *Outlet*; (b) laterais e teto como *Wall free slip* (sem atrito), pois não impõe resistência às partes do domínio onde não são realizadas análises importantes; e (c) piso e superfícies do edifício como *Wall no slip* (com atrito).

A simulação decorreu em regime permanente, na condição isotérmica a 25 °C (ação dos ventos). Segundo Brandão (2009), simulações que avaliam apenas a ação dos ventos normalmente são realizadas em regime permanente. Isso ocorre porque as condições de contorno são constantes e a relação entre o campo de velocidade e a velocidade de entrada do ar no modelo se mantém constante para velocidades médias ou altas. O modelo de turbulência utilizado foi o K-Epsilon, por oferecer a melhor relação entre custo (tempo de processamento) e benefício (precisão). Segundo Figueiredo (2007), este modelo é o mais validado e usado devido a sua baixa capacidade computacional. O nível de convergência foi estabelecido quando todos os níveis residuais alcançaram um valor MAX de  $10^{-4}$ . Os números de iterações mínimo e máximo adotados foram de 600 e 6.000, respectivamente. Estes parâmetros foram baseados em pesquisas sobre ventilação natural utilizando o CFX (BRANDÃO, 2009; COSTA, 2009; CÓSTOLA, 2006; FIGUEIREDO, 2007; LEITE, 2008; PRATA, 2005).

## Resultados

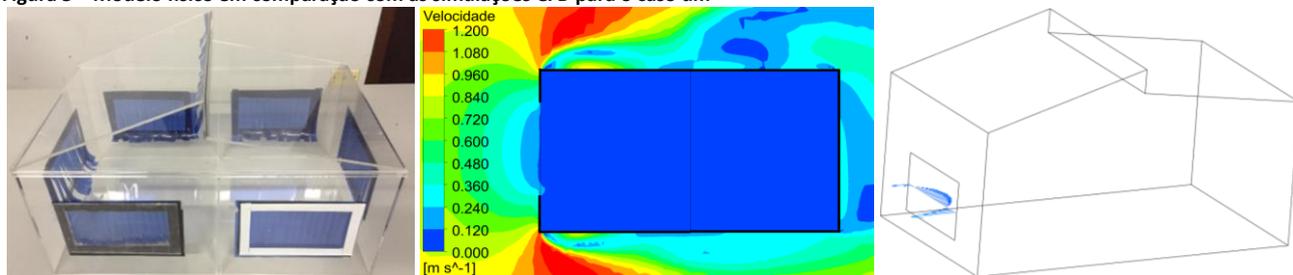
A seguir, apresenta-se a materialização da identificação do fluxo de ar no método simplificado (modelo físico reduzido) pela movimentação das cortinas nas aberturas e correspondência por uma ferramenta mais complexa (simulações CFD) em forma de vetores quantificados da direção do fluxo de ar.

No caso um (ventilação com apenas uma abertura na fachada a barlavento), nota-se claramente que a ventilação unilateral não possibilita a penetração do fluxo de ar por todo o ambiente interno. No modelo físico reduzido nota-se apenas a movimentação da cortina na janela a barlavento, no sentido de entrada de ar. No entanto, todas as outras cortinas permanecem estáticas, o que indica a movimentação de ar apenas na região da abertura, sem a penetração do fluxo de ar por todo o espaço interno. Este comportamento é comprovado com a simulação CFD, que apresenta os vetores da direção do fluxo de ar compatíveis com o sentido da cortina do modelo físico e velocidades internas do ar bastante reduzidas (Figura 5).

Essa situação apresenta uma melhora significativa com a inclusão de uma abertura na parede oposta, possibilitando uma ventilação cruzada com aumento do fluxo de ar no espaço interno (caso dois). Nota-se a corrente de ar entrando pela abertura a barlavento (sentido da cortina para dentro do ambiente) e saindo pela abertura a sotavento (sentido da cortina para fora do ambiente). Além disso, tem-se uma movimentação das cortinas das janelas laterais e na região superior, comprovando que o caso dois permite um melhor desempenho do fluxo de ar interno se comparado ao

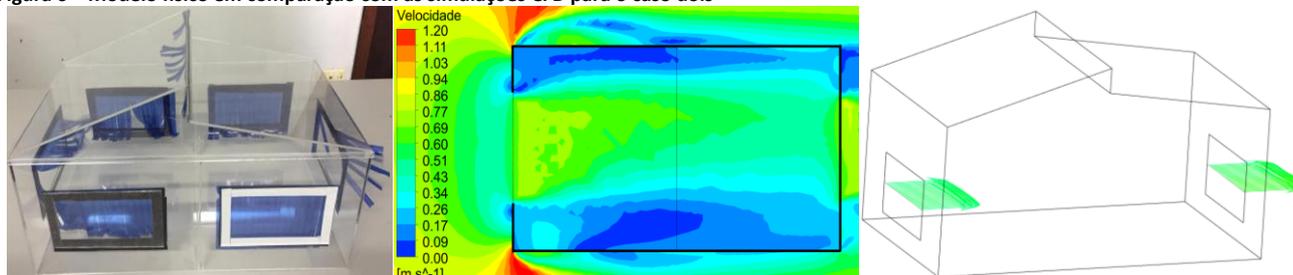
caso um. Isso é comprovado também pelas simulações, que registram uma maior velocidade e uma melhor distribuição do ar no espaço interno. Além disso, o sentido dos vetores extraídos pelas simulações é similar ao sentido das cortinas nos ensaios, comprovando-se novamente a similaridade entre os dois métodos utilizados nessa pesquisa (Figura 6).

Figura 5 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso um



Fonte: Os autores

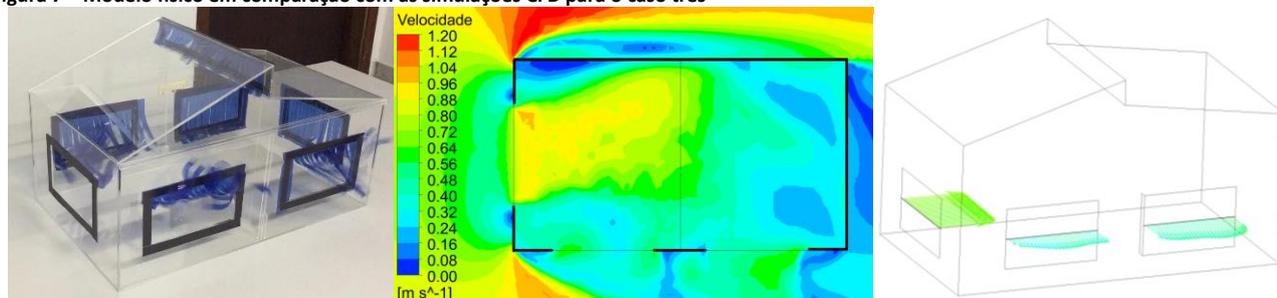
Figura 6 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso dois



Fonte: Os autores

A ventilação cruzada com as aberturas em paredes adjacentes (caso três) também possibilita um bom fluxo de ar interno com entrada do ar pela abertura a barlavento (sentido da cortina para dentro do ambiente) e saindo pelas aberturas laterais (sentido da cortina para fora do ambiente). No entanto, nota-se que o fluxo é lateralizado (no sentido das aberturas), não apresentando um movimento significativo na lateral oposta (sem aberturas). Isso é percebido no modelo pela movimentação da cortina apenas na janela próxima da abertura a barlavento, enquanto a outra, localizada mais ao fundo do ambiente interno, permanece estática. No CFD o mesmo comportamento foi constatado. O fluxo de ar é direcionado para a lateral do espaço, no sentido das aberturas na face a sotavento. Nota-se que a região oposta tem velocidades mais baixas do fluxo de ar interno, sendo as maiores velocidades concentradas na região próxima da abertura de entrada de ar (Figura 7).

Figura 7 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso três

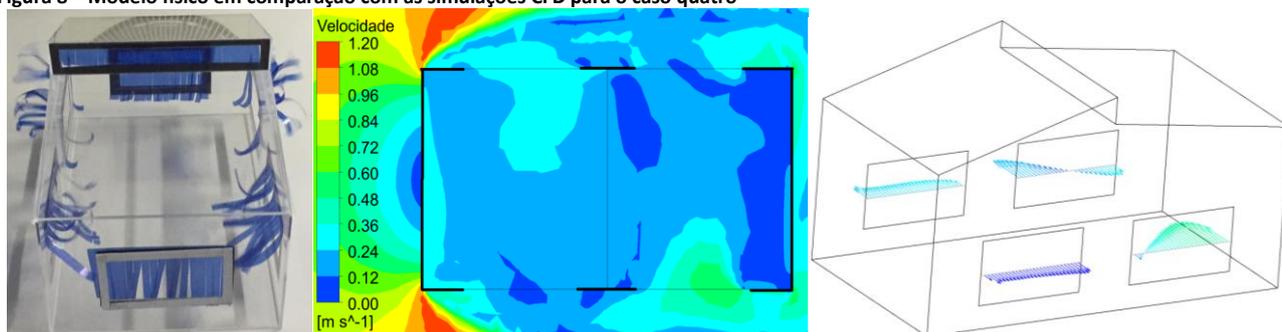


Fonte: Os autores

Quando não se tem aberturas orientadas no sentido dos ventos dominantes e sim nas paredes laterais (paralelas aos ventos externos – caso quatro), a corrente de ar

tangencia as aberturas, ocasionando uma região de sombra de vento nas laterais do modelo e pressões negativas. O vento que tangencia as aberturas ocasiona zonas de subpressão e sobrepressão e, assim, entrada e saída de ar pela mesma janela. No entanto, essas recirculações nas aberturas não penetram no edifício, formando zonas de estagnação do ar em todo o espaço interno, conforme comprovado nas simulações. Essa configuração, embora seja melhor que o caso um (ventilação unilateral), tem um desempenho reduzido em relação aos casos com ventilação cruzada (casos 02 e 03). Ressalta-se que para esse caso temos uma complexidade maior das diferenças de pressão entre as aberturas para o movimento do ar e, mesmo assim, nota-se uma semelhança das cortinas e do sentido dos vetores, entre o modelo simplificado e as simulações, comprovando novamente a eficiência do modelo para a representação visual do fenômeno analisado (Figura 8).

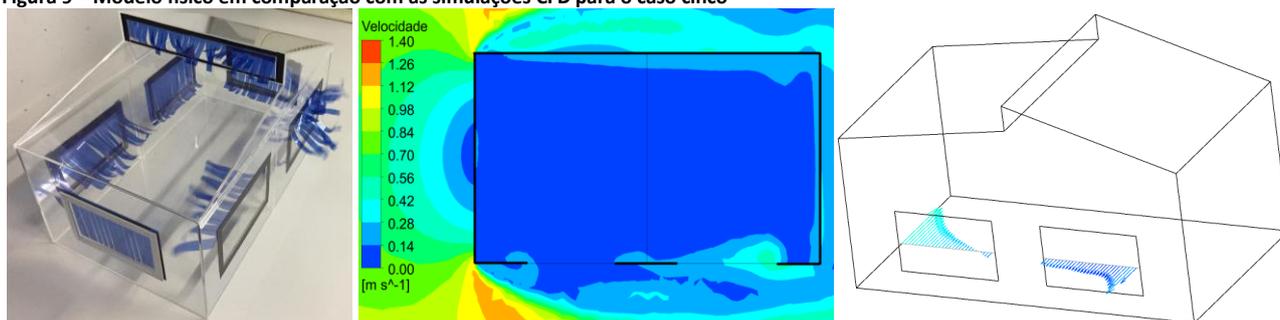
**Figura 8 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso quatro**



Fonte: Os autores

No caso cinco, em vez de quatro aberturas nas paredes laterais, tem-se apenas duas, em uma única parede lateral. Nota-se que a diferença de pressão entre as aberturas é menor, com entrada de ar por uma das aberturas e saída pela outra. Novamente, nota-se que o fluxo de ar permanece nessa região, não penetrando em todo o espaço interno. Esse comportamento novamente foi constatado nas simulações, que apresentam valores insignificantes de fluxo de ar interno, e no modelo físico, em que as cortinas das demais aberturas permanecem estáticas (Figura 9).

**Figura 9 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso cinco**

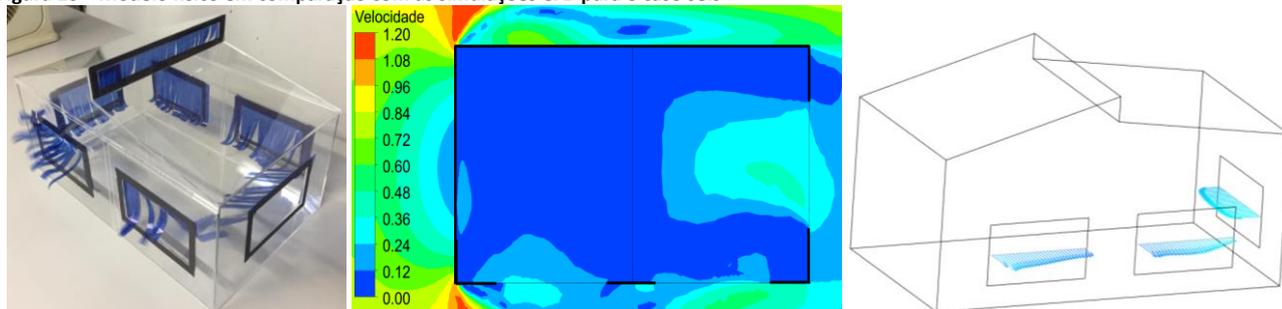


Fonte: Os autores

Quando, além das aberturas laterais, tem-se uma abertura na face a sotavento (caso seis), nota-se que o vento que incide na fachada a barlavento, sem a presença de aberturas, gera uma sombra de vento ao longo do edifício que ocasiona uma diferença de pressão nas aberturas, de modo que a abertura da face a sotavento se torna a entrada do fluxo de ar e as laterais, saídas do ar (sentido dos vetores nas simulações e da cortina no modelo). Nota-se um melhor desempenho em relação ao caso cinco. No entanto, a distribuição do fluxo de ar interno permanece com baixas velocidades ao

longo de todo o espaço interno, com exceção da região próxima à abertura por onde o ar entra no ambiente (Figura 10).

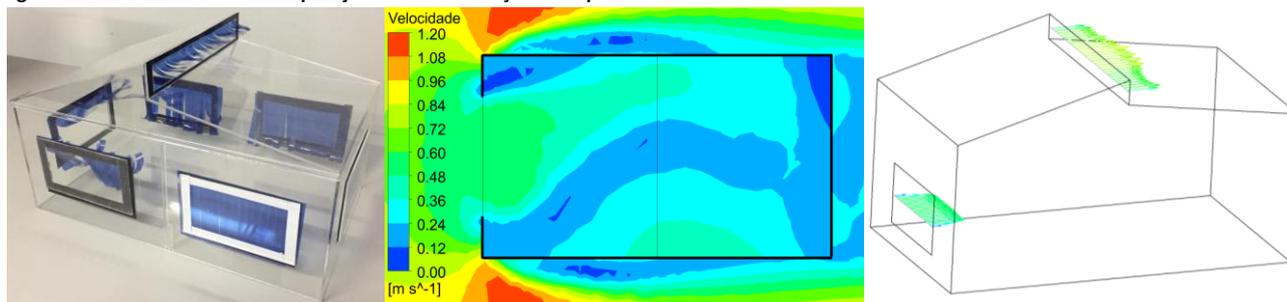
Figura 10 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso seis



Fonte: Os autores

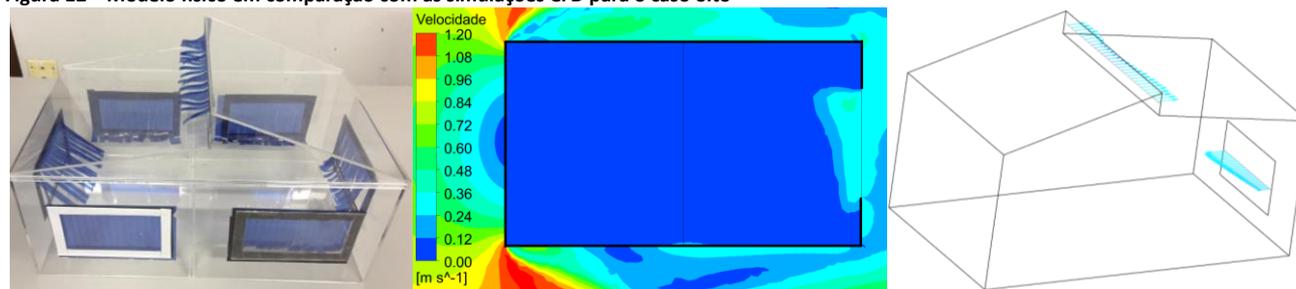
No caso sete tem-se ventilação cruzada vertical, com uma abertura mais baixa na face a barlavento (entrada do fluxo de ar) e uma abertura mais alta na cobertura, no sentido contrário aos ventos (extração do fluxo de ar). Nota-se uma grande compatibilidade entre as simulações e o modelo físico simplificado, apresentando resultados similares. Além disso, esta configuração das aberturas possibilita uma boa distribuição do ar ao longo do ambiente interno, com velocidades do ar significativamente maiores quando comparada aos casos 05 e 06, por exemplo (Figura 11).

Figura 11 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso sete



Fonte: Os autores

No caso oito tem-se uma inversão da localização das aberturas, em relação ao caso sete: inseriu-se uma abertura mais baixa na face a sotavento (que funciona como entrada do ar) e uma abertura mais alta na cobertura, no sentido contrário aos ventos dominantes (extração do ar). Isso acontece pois, embora ambas as aberturas estejam em regiões de sombra de vento (pressão negativa), tem-se uma diferença da pressão entre ambas, ocasionando a inversão do sentido do fluxo de ar. Nota-se ainda um baixo desempenho da ventilação natural interna, registrando velocidades muito baixas ao longo de todo o ambiente interno (Figura 12). Tanto o caso sete quanto o oito apresentam semelhanças da metodologia simplificada com as simulações CFD, demonstrando confiabilidade para o uso do modelo físico no ensino dos princípios básicos da ventilação natural com diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar.

**Figura 12 – Modelo físico em comparação com as simulações CFD para o caso oito**

Fonte: Os autores

## Conclusão

A comparação dos ensaios qualitativos simplificados do modelo físico em escala reduzida com as simulações CFD mostra claramente uma compatibilidade entre as ferramentas analisadas, mostrando que o método simplificado pode ser utilizado para o ensino em nível de graduação, auxiliando no entendimento dos princípios básicos da ventilação natural. Entretanto, destaca-se que o método simplificado aqui apresentado tem limitações, apresentando-se como uma análise exclusivamente qualitativa do fenômeno da ação dos ventos, também não permitindo a visualização da ventilação por efeito chaminé.

O modelo físico em escala reduzida apresentou resultados visuais similares aos adquiridos com as simulações CFD, comprovando que a definição da localização das aberturas pode ser auxiliada pelo uso desse modelo simplificado. Ressalta-se que modelos desse tipo, mas com outras configurações, podem ser construídos e testados para auxiliar os estudos nos primeiros estágios projetuais. No entanto, em etapas posteriores, que exigem definições de parâmetros quantitativos para um maior detalhamento das estratégias de ventilação natural, como valores de coeficientes de pressão e taxas de renovações de ar/hora, é necessário o uso de ferramentas mais completas como simulações CFD e/ou ensaios em túnel de vento.

Com relação aos modelos ensaiados, nota-se que os melhores desempenhos foram registrados para os casos que apresentam ventilação cruzada, seja com as aberturas em paredes opostas (caso 02); paredes adjacentes (caso 03) ou ventilação cruzada vertical (caso 07). Os piores desempenhos foram registrados nos casos com ventilação unilateral (caso 01); com aberturas nas fachadas laterais, paralelas aos ventos dominantes (casos 04 e 05); com aberturas nas fachadas laterais e na face a sotavento (caso 06); e no caso em que as aberturas estão orientadas no sentido oposto aos ventos dominantes, na fachada e na cobertura (caso 08).

Por fim, ressalta-se a importância da correta definição de estratégias projetuais simples no projeto arquitetônico, como a localização das aberturas nos edifícios. Muitas vezes o uso de estratégias simples e bem estudadas podem apresentar melhores desempenhos para o fluxo de ar interno do que o uso de estratégias complexas sem nenhuma base teórica e experimental.

## Referências

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the Atmospheric Boundary Layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, v. 41, n.2, p. 238-252, 2007.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>

BRANDÃO, R. S. *As Interações Espaciais Urbanas e o Clima*. 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CÂNDIDO, C.; DEAR, R. J. de; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and environment**, v. 45, p. 222-229, jan. 2010.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.005>

COST. Cost Action 14: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. Bruxelas: Cost, 2004.

COSTA, L. **Aproveitamento da Ventilação Natural nas Habitações: um estudo de caso na cidade de Aracaju – SE.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CÓSTOLA, D. **Ventilação Por Ação do Vento no Edifício: procedimentos para quantificação.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. **Proceedings Building Simulation**, Beijing, China, 2007.

EDWARDS, B.; HYETT, P. **Guía básica de la sostenibilidad.** Barcelona, G. Gilli, 3º edição, 2005.

FIGUEIREDO, C. A. **Ventilação Natural em Edifícios de Escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades do ponto de vista do conforto térmico.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Construção) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HARRIES, A. Notas de aula. In: Workshop: CFX – FAU/USP. São Paulo, 2005

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; LABAKI, L. C.; PINA, S. M. G.; BERTOLLI, S. R. A visualização do conforto ambiental no projeto arquitetônico. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO E QUALIDADE NO PROCESSO CONSTRUTIVO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 1998. p. 371-379.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; CELANI, M. G. C.; MOREIRA, D. C.; PINA, S. A. M. G.; RUSCHEL, R. C.; DA SILVA, V. G.; LABAKI, L. C.; PETRECHE, J. R. D. Reflexão sobre metodologias de projeto arquitetônico. **Revista ambiente construído**, v. 6, n. 2, p. 07-19, 2006.

LABAKI, L. C.; MATSUMOTO, E. CARAM, R. M. **Túnel de vento de camada limite atmosférica: calibração e ensaios de aberturas em edificações utilizando modelos reduzidos.** Relatório de projeto de pesquisa, 2012

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 3º edição. São Paulo: ProLivros, 2014.

LEITE, C. G. **Alterações da Ventilação Urbana Frente ao Processo de Verticalização de Avenidas Litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. A Influência dos Captadores de Vento na Ventilação Natural de Habitações Populares Localizadas em Climas Quentes e Úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 57-67, 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 (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MACIEL, A. A. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PRATA, A. R. **Impacto da Altura de Edifícios nas Condições de Ventilação Natural no Meio Urbano.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. Simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters. **Building and environment**, v. 53, p. 34-48, jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.004>

TREBILCOCK, M. (2007). **The integration of environmental sustainability issues in the design process of contemporary architectural practice**. Tese de doutorado, University of Nottingham, 2007.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Revista do ambiente construído**, v.10, n.4, p.37-58, 2010.

---

<sup>1</sup> **Camila Pizaia Bevilaqua**

Estudante de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Maringá. Endereço postal: Avenida Colombo, 5790, Maringá, PR, Brasil, CEP: 87020-900

<sup>2</sup> **Bianca Bressianini**

Estudante de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Maringá. Endereço postal: Avenida Colombo, 5790, Maringá, PR, Brasil, CEP: 87020-900

<sup>3</sup> **Maurício Hidemi Azuma**

Arquiteto e Urbanista. Doutor em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia. Professor Adjunto na Universidade Estadual de Maringá. Endereço postal: Avenida Colombo, 5790, Maringá, PR, Brasil, CEP: 87020-900

<sup>4</sup> **Marieli Azoia Lukiantchuki**

Arquiteta e Urbanista. Doutor em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia. Professora Adjunta na Universidade Estadual de Maringá. Endereço postal: Avenida Colombo, 5790, Maringá, PR, Brasil, CEP: 87020-900