

Avaliação da taxa de obstrução do modelo físico reduzido na área de ensaio na mesa d'água

Evaluation of the clogging rate of the reduced physical model in the test area o the water table apparatus

Maria Isabel Pedrosa Custódio 

Cesar Imai 

Fernando Vitor Marques da Silva 

Alessandra Rodrigues Prata Shimomura 

Marieli Azoia Lukiantchuki 

Resumo

A mesa d'água possibilita a visualização qualitativa da ventilação natural em modelos físicos reduzidos. A qualidade dos resultados depende de diversos parâmetros, tais como a taxa de obstrução do modelo físico reduzido na área de ensaio. No entanto, faltam pesquisas científicas que analisam a influência dessa taxa na qualidade dos resultados. O objetivo do artigo é avaliar, qualitativamente, o comportamento do fluido para diferentes valores de taxa de obstrução do modelo físico reduzido na área de ensaio da mesa d'água. O método foi dividido em quatro etapas: seleção dos modelos; construção dos modelos físicos reduzidos; ensaios na mesa d'água e simulações *Computational Fluid Dynamics* (CFD). De forma geral, o comportamento do fluido nos experimentos e nas simulações são similares. No entanto, os modelos com baixa e alta taxa de obstrução apresentam dificuldade de manipulação e visualização do comportamento do fluido. Nota-se que as taxas de obstrução entre 24,14% e 30,49% (corte) e as taxas entre 4,16% e 3,26% (planta) apresentaram melhor desempenho. Entretanto, não foi possível determinar uma escala exata para os ensaios, pois esta irá variar conforme proporções do modelo a ser estudado.

Palavras-chave: Mesa d'água. Taxa de obstrução. Ventilação natural.

Abstract

The water table apparatus allows the qualitative visualization of natural ventilation in reduced physical models. The quality of the results depends on several parameters, such as the obstruction rate of the reduced physical model in the test area. However, there is a lack of scientific research that analyzes the influence of this rate on the quality of results. The objective of this article is to qualitatively evaluate the fluid behavior at different values of clogging rate of the reduced physical model of the test area on the water table. The research method was divided into four stages: model selection; construction of reduced physical models; experimental tests on the water table and simulations of *Computational Fluid Dynamics*. In general, the behavior of the fluid in the experimental and simulation results is similar. However, the models with low and high obstruction rates present difficulties in handling and visualizing the behavior of the fluid. Thus, it is concluded that frontal obstruction rates (in cross section) between 24.14% and 30.49% and in-plan obstruction rates between 4.16% and 3.26% showed better performance. However, it is not possible to determine an exact scale for carrying out tests, as the scale will vary according to the proportions of the model to be studied.

Keywords: Water table. Obstruction rate. Natural ventilation.

¹Maria Isabel Pedrosa Custódio

¹Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

²Cesar Imai

²Universidade Estadual de Londrina
Londrina - PR - Brasil

³Fernando Vitor Marques da Silva

³Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa - Portugal

⁴Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

⁴Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

⁵Marieli Azoia Lukiantchuki

⁵Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

Recebido em 09/11/22

Aceito em 08/02/23

Introdução

A ventilação natural é uma importante estratégia bioclimática em países de clima quente e úmido, como a maior parte do território brasileiro, para reduzir o desconforto térmico dos usuários, além de possibilitar a salubridade dos ambientes e a redução do consumo de energia elétrica. Dentre essas funções, a preocupação com a salubridade e a dispersão de aerossóis foi destacada recentemente pela pandemia do Covid-19. Segundo Oliveira *et al.* (2020), o hábito de manter a ventilação natural nos ambientes é um dos passos mais importantes para se conter o vírus SARS-CoV-2, visto que essa estratégia passiva se configura como um importante mecanismo de diluição e remoção dos aerossóis transportados pelo ar.

O uso correto da ventilação natural no projeto de arquitetura requer o auxílio de ferramentas e equipamentos que representem visualmente, de maneira facilitada e confiável, o movimento do fluxo de ar no exterior e interior das edificações. De acordo com Omrani *et al.* (2017), é importante que a ventilação natural seja incorporada desde a concepção do projeto e, para isso, o uso de ferramentas que facilitem a compreensão do fenômeno e, assim, a incorporação no projeto de arquitetura, é essencial. As formas de análise e predição da ventilação natural podem ser divididas em três categorias principais:

- (a) métodos analíticos e empíricos;
- (b) simulação por dinâmica dos fluidos computacional (*computational fluid dynamic*); e
- (c) experimentos em escala real e reduzida.

Além disso, segundo Xavier *et al.* (2020), existem outras formas de avaliar a ventilação natural de forma simplificada, tais como programas de simulação de escoamento bidimensional. Dentre as diversas opções, destaca-se o software Fluxovento, desenvolvido com base em técnicas de computação gráfica interativa e conceitos de dinâmica dos fluidos computacional pelos pesquisadores Carlos Vitor de Alencar Carvalho, Luiz Fernando Martha e Walter Teixeira da PUC-Rio. Cada uma dessas ferramentas possui vantagens e desvantagens que indicam qual é a mais adequada para cada caso específico. No entanto, segundo Fortuna (2000), em análises de escoamento dos fluidos é interessante que as diferentes técnicas se complementem, confirmando ou não a compatibilidade entre elas.

Dentre as opções citadas acima, destacam-se os experimentos realizados através da mesa d'água, que é um equipamento hidráulico que possibilita a visualização da ventilação natural em modelos de escala reduzida (PEREIRA; TOLEDO, 2004). A utilização de equipamentos hidráulicos na visualização dos efeitos do escoamento de fluidos em meio líquido podem ser classificados em túneis, tanques e canais. Os túneis e tanques permitem a visualização tridimensional do escoamento através de caixas fechadas, enquanto nos canais a representação ocorre em duas dimensões, podendo ser paralelos, convergentes e divergentes. A mesa d'água pertence ao grupo dos canais.

Este equipamento constitui-se em uma caixa de vidro transparente, com formato horizontal, sustentada por uma base de ferro, composta por uma bomba d'água que tem a capacidade de impulsionar a água do reservatório à jusante para montante, por meio de uma tubulação transversal (NASCIMENTO; BARROS; BATISTA, 2016). A visualização do escoamento através da mesa d'água ocorre a partir da passagem da água misturada com um indicador (TOLEDO; PEREIRA, 2003) e, segundo Blessmann (1983), essa mistura fluida em contato com obstáculos, tais como os modelos reduzidos, permite a visualização dos desvios do fluxo, como a formação de vórtices e esteiras.

Segundo Cóstola (2006), a diferença de fluidos não prejudica os resultados no caso de experimentos de ventilação natural em regime permanente, e pode-se destacar que esse equipamento se apresenta como uma boa alternativa aos métodos de simulação por *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e ao túnel de vento, em relação ao custo. Segundo Matsumoto e Labaki (2011), o túnel de vento é de difícil acesso devido ao elevado custo de execução e dificuldade de operação. Sobre isso, os programas CFD também se tornam pouco acessíveis aos projetistas e estudantes, pois demandam um alto investimento inicial e conhecimentos específicos de modelagem. Assim, a mesa d'água se torna uma ótima opção, pois além de ser mais acessível para o uso, tem elevado potencial para usos didáticos. De acordo com Toledo e Pereira (2003) e Rossi *et al.* (2018), as principais vantagens do referido equipamento são o baixo custo de execução; a facilidade de operação e manutenção; a facilidade de uso de maquetes pelos arquitetos e a visualização continuada do escoamento. No entanto, a mesa d'água também apresenta limitações, tais como a visualização do fenômeno em apenas duas dimensões, simplificando a realidade do fenômeno que é tridimensional; não possibilitam a avaliação da ventilação por diferença de temperatura e dificultam as análises quantitativas através da dificuldade de mensuração de parâmetros como a pressão.

Diversas pesquisas científicas sobre a mesa d'água foram desenvolvidas visando avaliar o comportamento da ventilação natural em edificações (TOLEDO; PEREIRA, 2003; PEREIRA; TOLEDO, 2004; TOLEDO; LAURENTINO, 2010; RIBEIRO; BITTENCOURT, 2016; ROYAN; VAIDYA, 2020). Essas pesquisas limitaram-se à análise do desempenho de elementos arquitetônicos específicos, mas confirmaram a mesa d'água como um equipamento didático e eficaz. Na pesquisa de Royan, Vaidya e Mundhe (2018), avaliou-se o funcionamento do equipamento de forma geral e o seu potencial didático com os estudantes em sala de aula. Já no estudo de Mundhe e Damle (2020), desenvolveu-se um método fotográfico de quantificação dos padrões de fluxos na mesa d'água, demonstrando que é um equipamento útil para a comparação de diferentes configurações geométricas na fase de projeto.

Segundo Mundhe e Damle (2020), a mesa d'água, comparada a outros métodos de análise da ventilação natural, como o CFD ou túnel de vento, ainda apresenta poucos estudos que avaliem seus parâmetros de ensaio. Há 10 anos atrás, Toledo e Pereira (2003) já pontuaram que apesar desse equipamento possuir um grande potencial de uso para fins práticos e didáticos, são pouco utilizados para a visualização da ventilação natural. Além disso, existe uma falta de pesquisas científicas comparando esse equipamento didático com outros de maior complexidade e confiabilidade, a fim de atestar a sua eficiência e o limite do seu potencial de uso. Outras pesquisas (ROSSI *et al.*, 2019; RISTIC, 2007; XAVIER *et al.*, 2020) utilizaram a mesa d'água como um meio de auxiliar, calibrar ou comparar os ensaios com resultados em outras ferramentas, como o túnel de vento ou CFD. Nas pesquisas de Rossi *et al.* (2019) e Xavier *et al.* (2020), os resultados da mesa d'água foram comparados com ensaios no túnel de vento e simulações CFD, respectivamente, mas em modelos simplificados e sem explorar a diferença entre os fluidos analisados; as diferentes condições de contorno e modelos com geometrias mais complexas.

Nota-se a lacuna no desenvolvimento de pesquisas científicas que analisaram os parâmetros de entrada da mesa d'água que são de grande importância para a confiabilidade dos resultados qualitativos. Esses parâmetros estão relacionados ao tipo e à concentração dos traçadores (elemento indicador para formar a espuma que permite a visualização do padrão do fluxo de ar no ensaio); à altura da lâmina de água; à velocidade do fluido; às frequências para a realização dos ensaios e à escala do modelo físico reduzido que vai determinar a taxa de obstrução do modelo na área de seção de ensaio. No trabalho desenvolvido por Custódio, Shimomura e Lukiantchuki (2021), parâmetros básicos de ensaio, como diferentes traçadores e suas concentrações, assim como as frequências para realização dos ensaios, foram analisados, visando discutir quais seriam mais adequados para a realização de ensaios, visando resultados mais coerentes com a literatura especializada.

Sendo assim, este artigo tem como objetivo analisar a influência que diferentes taxas de obstrução do modelo físico reduzido posicionado na área de ensaio da mesa d'água têm no comportamento qualitativo do fluido. Buscando analisar quais taxas de obstrução são mais adequadas, os experimentos foram comparados com simulações de dinâmica dos fluidos computacional. Busca-se, aqui, contribuir com os dados de entrada dos experimentos na mesa d'água, auxiliando no processo de calibração de futuras pesquisas científicas.

Método

O método do pesquisa adotado foi híbrido: experimental, mediante ensaios analógicos no equipamento mesa d'água e simulações computacionais CFD. Para isso, a pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas:

- (a) escolha dos modelos e dos parâmetros de ensaio;
- (b) construção dos modelos físicos reduzidos;
- (c) ensaios na mesa d'água; e
- (d) simulações CFD.

Seleção dos modelos e dos parâmetros analisados

Foram utilizados dois modelos em diferentes escalas para a elaboração dos modelos físicos reduzidos. Inicialmente, a influência da taxa de obstrução na distribuição do fluxo de ar foi analisada em um modelo simplificado e conhecido na literatura especializada. Após isso, essa mesma análise foi realizada em uma edificação com maior complexidade geométrica. O modelo 1 possui dimensões de 3 m x 3 m e as aberturas centralizadas são localizadas nas paredes opostas. Essa configuração foi escolhida com base nos estudos apresentados por Givoni (1976) e Freixanet e Viqueira (2004), considerando que é um modelo comum em diversos trabalhos da literatura especializada e cujo comportamento do fluxo de ar interno é apresentado nesses estudos, o que possibilita mais uma forma de conferência dos resultados experimentais e numéricos desta

pesquisa. Xavier *et al.* (2020) reforçam que a escolha por modelos simplificados facilita a compreensão do fenômeno da ventilação natural, possibilitando a comparação dos resultados com dados já obtidos na literatura especializada.

No modelo 02, tem-se uma maior complexidade na análise do fenômeno da ventilação natural, comparado ao modelo 01, pela inclusão de divisórias internas e a existência de diversos ambientes. Trabalhos anteriores, tais como o de Toledo e Pereira (2003), reforçaram a importância da análise da ventilação natural em edifícios de formas complexas, tais como apartamentos e habitações. Desse modo, escolheu-se uma tipologia de habitação de interesse social representativa do que é utilizada atualmente em Maringá, PR, com base no trabalho de Sarvezuk (2020). O modelo é uma casa térrea, unifamiliar, com dois dormitórios, cozinha e sala conjugadas e um banheiro, apresentando área útil de 42 m² e dimensões externas de 5,0 m x 7,5 m (Figura 1).

Os modelos físicos reduzidos foram ensaiados para três diferentes ângulos de incidência da ventilação (0°, 45° e 90°). Em seguida, selecionaram-se as escalas dos modelos e, assim, as taxas de obstrução avaliadas. As diversas escalas do modelo avaliam diferentes graus de obstrução nos ensaios com a mesa d'água e sua influência nos resultados qualitativos do padrão do fluxo de ar interno. A taxa de obstrução é uma relação simples da porcentagem da área ocupada pelo modelo em relação à área de ensaio, conforme apresentado na Figura 2. É importante destacar que a área ocupada pelo modelo em posição frontal é modificada a depender do ângulo de inclinação do modelo, pois em 0° a área ocupada pelo modelo é uma relação da dimensão lateral do modelo com a sua altura e para 45° a dimensão utilizada para essa relação será a diagonal do modelo. Para este artigo foram avaliadas as taxas de obstrução frontal (em corte) e em planta, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 1 - Modelos de ensaio

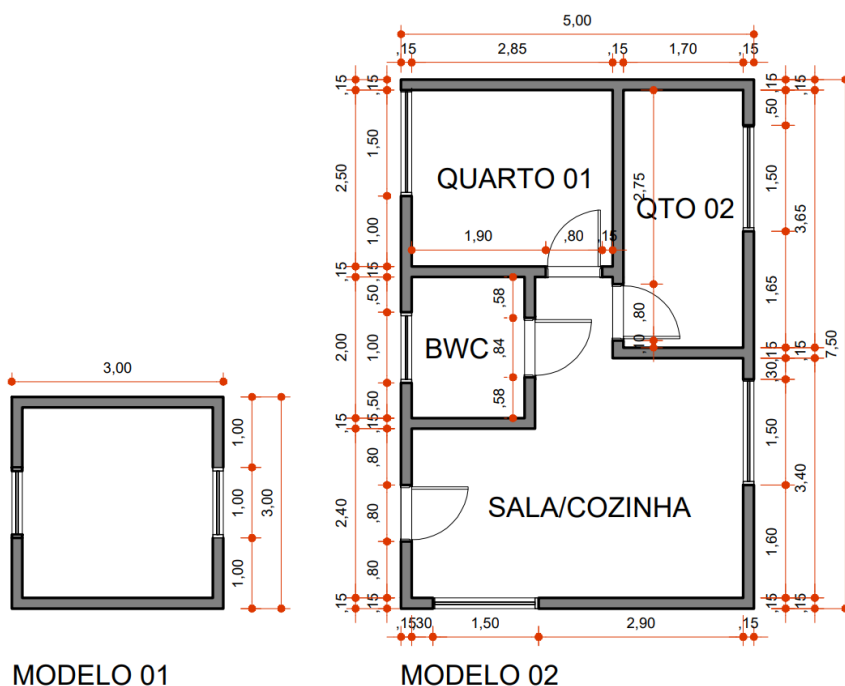
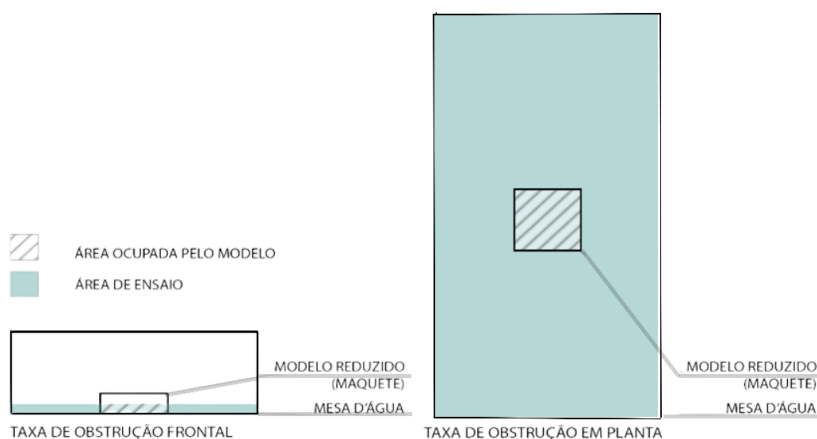


Figura 2 - Taxa de obstrução da área de ensaio



Quadro 1 - Taxas de obstrução para o modelo 1 nas diferentes escalas

Modelo	Escala	Taxa de obstrução frontal	Taxa de obstrução em planta	Imagem
1	1:50	7,32%	0,28%	
2	1:30	12,20%	0,78%	
3	1:13	24,14%	4,16%	
4	1:7,5	48,78%	12,51%	

Os modelos 1 e 2 foram avaliados em diferentes escalas obtendo diferentes taxas de obstrução (Quadro 1). A escolha das escalas se baseou nas medidas resultantes no modelo, sendo a escala 1:50 aquela que apresenta a menor taxa de obstrução (7,32%) e que mais se assemelha a taxas de obstruções utilizadas em outras pesquisas científicas (GIVONI, 1976; FREIXANETE; VIQUEIRA, 2004; SARVEZUK, 2020) e a escala 1:7,5, a que apresenta a maior taxa de obstrução (48,78%), resultando em um modelo com 40 cm de largura. Posteriormente, definiram-se três escalas entre a maior e a menor, visando intervalos semelhantes. O modelo

2 foi ensaiado nas escalas 1:50, 1:30 e 1:13, pois escalas menores possibilitam modelos em dimensões superiores às da área de ensaio (Quadro 2).

Construção dos modelos físicos reduzidos

Os modelos reduzidos foram confeccionados para otimizar a produção e reduzir os custos, uma vez que a utilização de material acrílico com corte a laser pode ser inviável para a utilização simplificada da mesa em alguns casos. O material escolhido para a fabricação dos modelos foi o PVC expandido, por se tratar de um material normalmente utilizado na fabricação de maquetes; além de possuir resistência à água e facilidade de manipulação.

A chapa de PVC adquirida para os modelos possui 3 mm de espessura, desconsiderando a diferença de espessura em diferentes escalas do modelo. Ressalta-se a importância de considerar este parâmetro na construção dos modelos físicos reduzidos, em conformidade com a mudança de escalas em pesquisas futuras. A espessura das paredes pode ter uma importante influência na rigidez do modelo, visando evitar deformações que afetam significativamente os resultados qualitativos. Os fechamentos externos foram realizados com 3 cm de altura e as aberturas foram confeccionadas sem tocar no fundo da mesa para permitir a livre passagem do fluido (Figura 3). O PVC foi pintado de verde para facilitar a visualização do fluido, uma vez que a espuma ocasionada pelo traçador possui coloração branca.

Ensaio na mesa d'água e parâmetros para a realização dos ensaios

A mesa d'água utilizada nesse estudo possui área de ensaio de 1,53 m x 0,82 m e é revestida por material autoadesivo preto para facilitar a visualização dos resultados. O equipamento possui dois tanques de água com capacidade de aproximadamente 110 litros cada um, conectados por uma bomba de 0,75CV e 60 Hz. Um inversor de frequência, modelo Weg CFW100 monofásico 0,5CV 220V 2,6A, é responsável por controlar a velocidade e a frequência do fluxo de água. As configurações da mesa d'água para os ensaios são apresentadas no Quadro 3, sendo que esses parâmetros foram definidos com base em ensaios com diferentes tipos e concentrações dos traçadores e frequências de ensaio (CUSTÓDIO, 2022).

Quadro 2 - Taxas de obstrução para o modelo 2 nas diferentes escalas

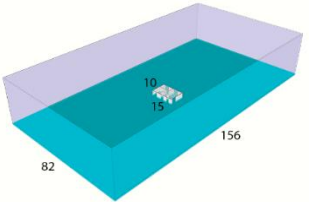
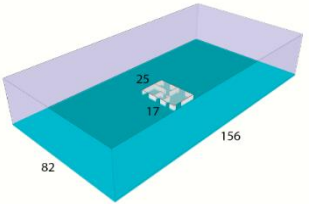
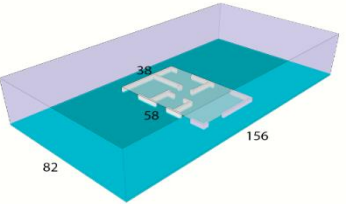
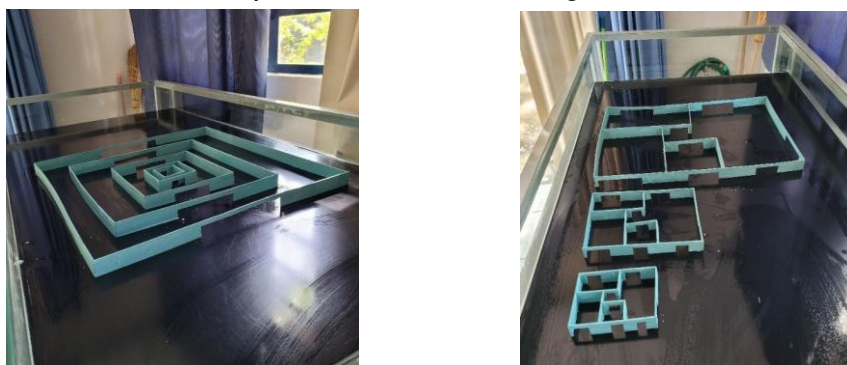
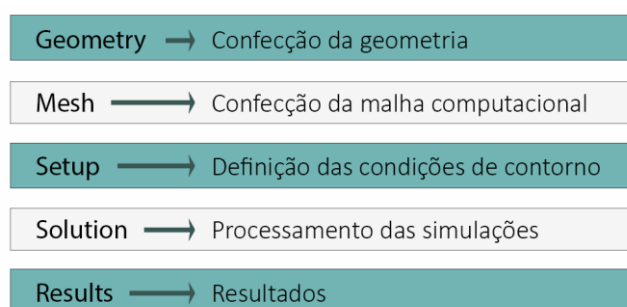
Modelo	Escala	Taxa de obstrução frontal	Taxa de obstrução em planta	Imagem (dimensões em cm)
1	1:50	18,98%	1,17%	
2	1:30	30,49%	3,26%	
3	1:13	70,36%	17,35%	

Figura 3 - Modelos físicos utilizados para os ensaios na mesa d'água



Quadro 3 - Configurações de ensaio na mesa d'água

Ensaio na mesa d'água	
Frequência de ensaio	20 Hz
Traçador utilizado	Lava roupas Tixan Ypê
Concentração do traçador	200 ml
Quantidade total de água para o ensaio (litros)	220 litros
Altura da lâmina d'água	1 cm

Figura 4 - Etapas *Workbench*

Simulações computacionais

Utilizou-se neste estudo o *software* ANSYS ACADEMIC STUDENT 2021 R2 aplicando a *suit* denominada *Workbench* e esta é composta pelas etapas apresentadas na Figura 4 e detalhadas na sequência.

Confecção da geometria

O *software* utilizado para a modelagem da geometria foi o AutoCAD 2020 da Autodesk. A modelagem manteve todos os elementos unidos de forma que a edificação fosse extraída do domínio. Utilizou-se o comando *polyline* para o desenho da planta do edifício e limites do domínio; o comando *extrude* para extrudar todos os elementos nas alturas determinadas; o comando *subtract* para extrair as aberturas do edifício; e por fim o comando *subtract* para extrair o edifício do domínio, gerando um espaço negativo. Em seguida, o modelo foi exportado na extensão *.SAT para posteriormente ser importada no CFX.

O volume no qual o fluxo é calculado é o domínio computacional. Optou-se por um domínio retangular, por possibilitar uma malha com menor número de elementos, em comparação com o domínio octogonal (LEITE, 2015). Utilizaram-se as dimensões do modelo equivalente ao modelo físico reduzido e para o domínio, independente do modelo avaliado, aplicou-se as dimensões da área de ensaio da mesa d'água:

- (a) largura = 82 cm;
- (b) altura = 30 cm; e
- (c) comprimento = 156 cm.

A Figura 5 representa a modelagem do domínio computacional com o modelo 1, localizado no centro do domínio, assim como a realização dos ensaios na mesa d'água. Além disso, as simulações também foram realizadas em 2D, em condições semelhantes às dos ensaios na mesa d'água, a fim de reforçar a comparação entre as duas ferramentas.

Confecção da malha computacional

De acordo com Cóstola e Alucci (2011), o volume ao redor do edifício é dividido em uma malha composta de “pequenos” volumes, para os quais são realizados os cálculos de conservação de massa e quantidade de movimento, e estas podem ser do tipo hexaédrica, tetraédrica, prismática ou piramidal. Quanto mais fina a malha, mais precisos são os resultados. A malha utilizada foi constituída de tetraedros em um refinamento global *fine*, com uma base prismática com *transition* *r*atio de 0,55; *maximum layers* de 4 e *growth rate* de 1,2.

Definição das condições de contorno

Nessa etapa, determinam-se as condições de contorno, tais como o modelo de turbulência a ser utilizado, as condições do fluido, a temperatura do ar no domínio, o número de interações e a localização dos pontos de monitoramento para o teste de independência de malha. As condições de contorno adotadas neste artigo consideram a entrada de ar como “*inlet*”, a saída como “*outlet*” e as demais como “*wall*”, sendo as laterais e o céu nomeados como “*Sky*” no modo “*free slip wall*”; o piso nomeado como “*Ground*”, na opção “*no slip (smooth wall)*” e o edifício como “*Building*”, também com “*no slip (smooth wall)*”, seguindo as recomendações de Franke *et al.* (2004).

Com relação ao modelo de turbulência, de acordo com Cóstola (2006), as malhas espaçadas impedem que as equações de Navier-Stokes reproduzam por si só a turbulência em um escoamento. Para isso, seria necessário adotar malhas muito refinadas para que a turbulência fosse obtida somente pelo uso das equações de Navier-Stokes, em uma técnica chamada de *Direct Numerical Simulation* (DNS), o que seria inviável para o presente estudo. Assim, utilizou-se o modelo *K-epsilon*, sendo este o modelo mais comum a ser utilizado em simulações de escoamento de fluidos não laminares.

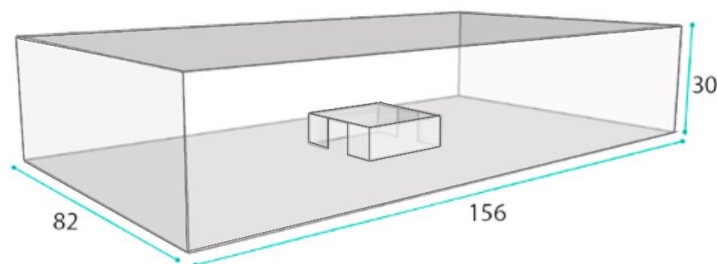
Processamento das simulações

Nesta etapa são processados os dados, de acordo com os resíduos estipulados na quantidade de interações pré-determinadas, e são gerados os gráficos utilizados para o monitoramento da convergência. Para simulações satisfatórias e confiáveis, recomenda-se o uso do valor de 10^{-4} para o máximo de resíduos.

Forma e análise dos resultados

Para a análise qualitativa da ventilação natural, as imagens geradas pelas duas ferramentas analisadas foram comparadas, visando analisar os fenômenos de escoamento, tais como vórtices; movimentos desuniformes e regiões de concentração e ausência do fluxo de ar. Os ensaios finais na mesa d'água foram registrados em fotos e vídeos com a utilização de um aparelho *smartphone* que possui as seguintes especificações: câmera de 12 megapixel e resolução de 4.000 x 3.000 pixels, com F 2.2 de abertura. As cenas dos vídeos foram convertidas em imagens sequenciais, possibilitando a captura de todos os detalhes dos ensaios. O aparelho foi instalado em um suporte móvel de ferro a uma altura de 1 m acima da mesa d'água.

Figura 5 - Representação do domínio computacional com o modelo 1



Já os resultados das simulações computacionais, para a análise do desempenho qualitativo da ventilação natural, foi gerado um plano horizontal, localizado no centro da abertura e do modelo. Desse plano foram plotados vetores de intensidade e direção do fluxo de ar, utilizando contorno de gradação de cores, para as velocidades do ar. Foi utilizada uma escala em que cada cor representa um valor de velocidade, sendo vermelho os valores mais altos e azul os valores mais baixos.

Resultados e discussões

A seguir, são apresentados os resultados dos experimentos na mesa d'água e das simulações computacionais através do *software* CFD, para os modelos 1 e 2, para as diferentes escalas analisadas.

Análise qualitativa do fluxo de ar para o modelo 1

As simulações computacionais do modelo 1 nas diferentes escalas apresentam, de forma geral, um comportamento similar do padrão do fluxo de ar representado experimentalmente pela mesa d'água (Quadros 4 a 8). No entanto, é visível a diferença de velocidade apresentada conforme a escala se altera, pois, à medida que a escala do modelo diminui, tem-se um aumento da velocidade do fluido, tanto interna quanto externamente. Na mesa d'água, essa mudança de velocidade não tem uma comprovação quantitativa e bem visível em decorrência da natureza da representação do fluido pela espuma.

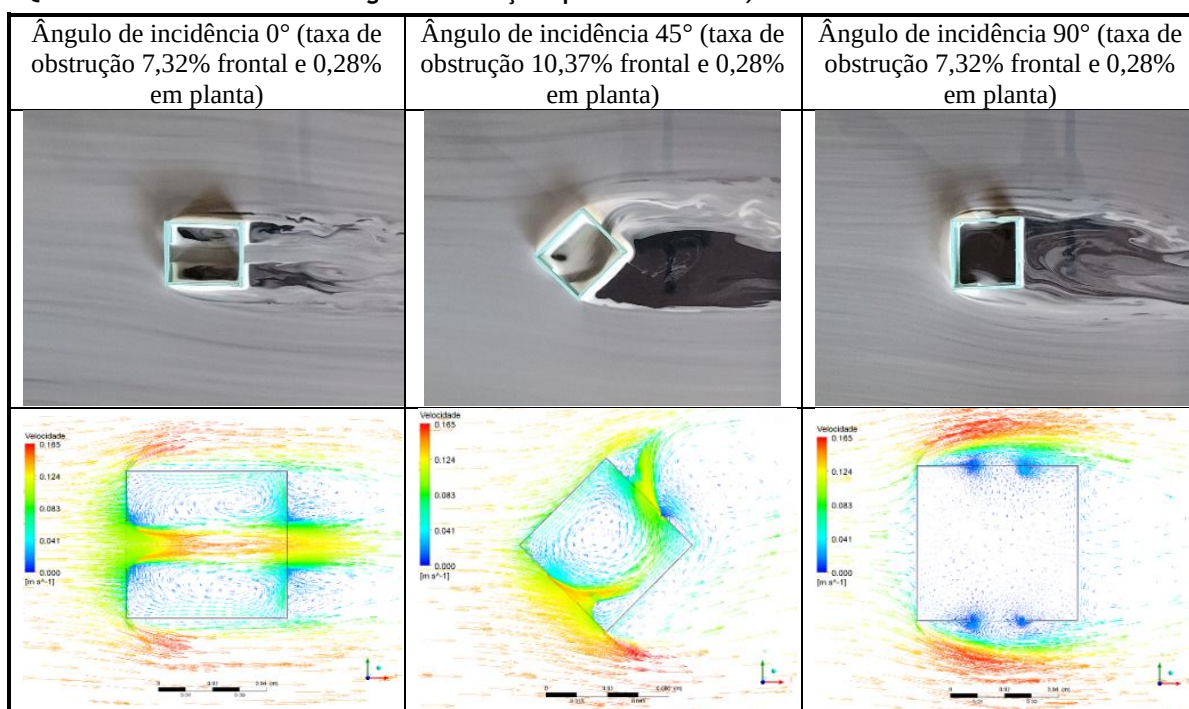
O modelo 1 na escala 1:50 (Quadro 4), apresenta boa visualização interna da distribuição do fluido e tem-se uma grande semelhança dos experimentos com as simulações, para os ângulos de direção do escoamento de 0° e 90°. No entanto, quando o modelo é rotacionado (ângulo de 45°), a visualização se torna confusa e prejudicada. Na parte externa do modelo tem-se uma dificuldade de visualização das zonas de separação e nos três casos (0°, 45° e 90°) é possível perceber grande turbilhonamento do fluido na saída, o que não é visível nos outros casos. Apesar da boa representação interna da distribuição do fluido, o tamanho reduzido do modelo dificulta a manipulação e a visualização do comportamento do fluido sem a utilização de câmeras. No entanto, essa escala facilita a movimentação do modelo na mesa para variações de futuros ensaios, como ângulo de direção do escoamento.

Além dos pontos anteriores, é importante ressaltar que os modelos ensaiados para o escoamento incidindo a 45° podem apresentar diversas imprecisões do padrão do fluido no interior e no exterior do ambiente. Isso pode ocorrer em virtude de uma pequena alteração do posicionamento do modelo em relação ao ângulo de entrada do fluido ocasionado pela força da água sobre o modelo. Assim, recomenda-se muita atenção e precisão no posicionamento do modelo, buscando evitar comportamento irreal do fluido em alguns pontos do ambiente interno.

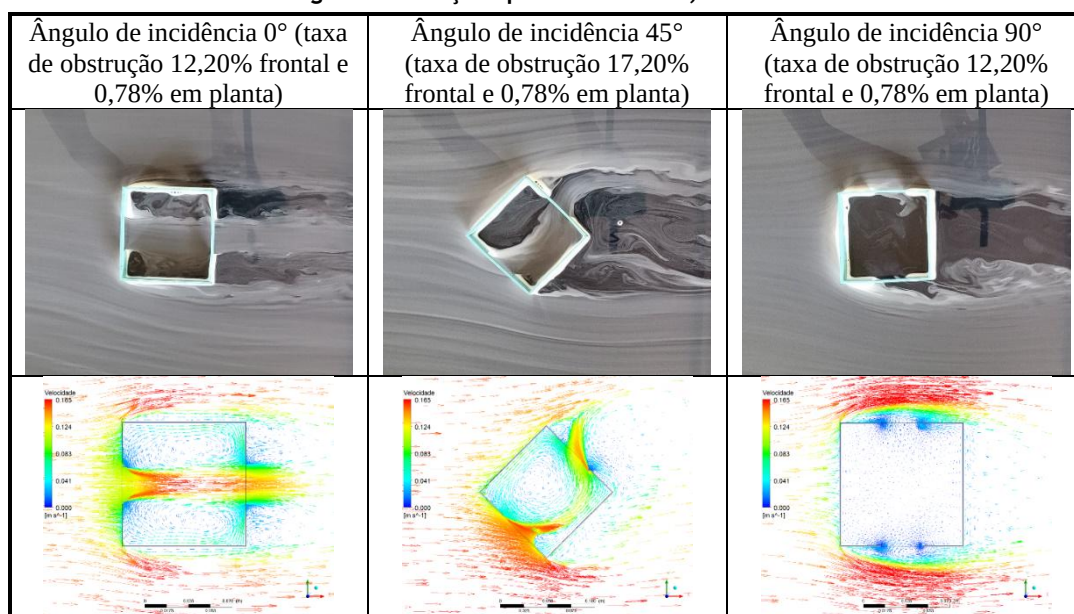
Para o modelo 1 na escala 1:30 (Quadro 5), nota-se uma boa visualização interna do comportamento do fluido para os três ângulos de direção do escoamento analisados. Externamente, a visualização dos efeitos de separação do fluido em contato com o modelo apresenta turbilhonamento excessivo na saída. O tamanho do modelo ainda dificulta a manipulação na área de ensaio, mas a visualização do comportamento do fluido é mais clara internamente, apresentando-se como uma boa opção para modelos maiores.

O modelo construído na escala 1:13 (Quadro 6) foi o que apresentou maior facilidade de manipulação na área de ensaio, para os três ângulos de direção do escoamento analisados. Contudo, é possível perceber que existe a presença de recirculações internas na parte inferior e superior nas simulações, para o caso ensaiado para o ângulo de 0°, o que não aconteceu nessa mesma situação nos experimentos na mesa d'água. Essa falta de recirculação interna também pode ser notada para o ângulo de 45°, o que pode ter ocorrido devido à baixa densidade do traçador. À direita dos modelos, para os três ângulos de direção do escoamento analisados, nota-se que o comportamento do fluido nos ensaios se aproxima do que é apresentado pelas simulações, principalmente com relação às sombras de vento.

Quadro 4 - Ensaios na mesa d'água e simulações para o modelo 1, na escala 1:50



Quadro 5 - Ensaios na mesa d'água e simulações para o modelo 1, na escala 1:30

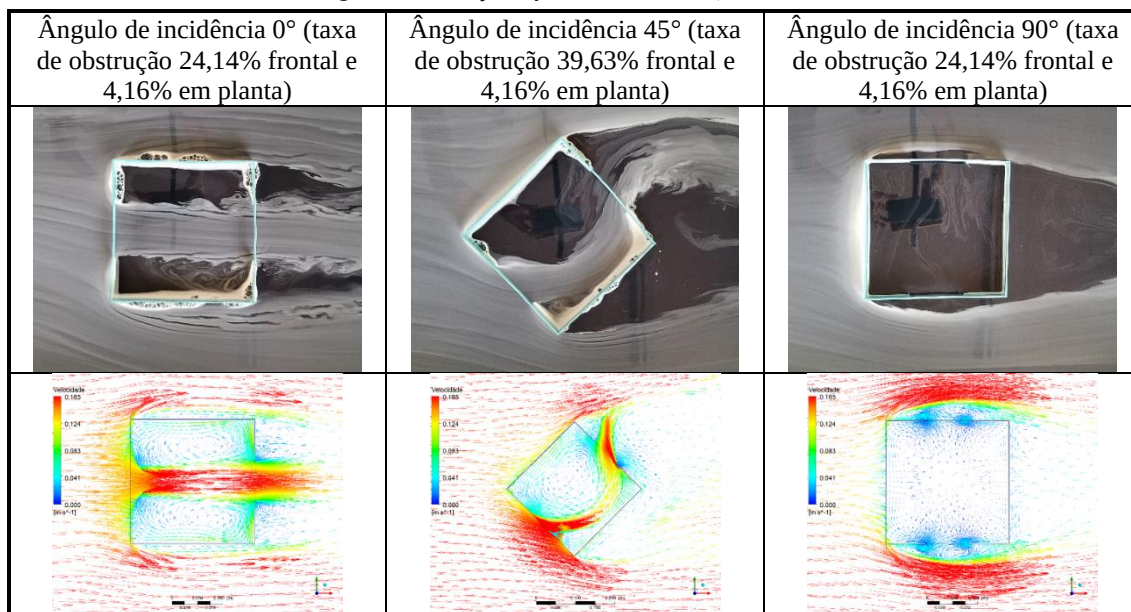


No entanto, tanto em 0° quanto em 45°, o fluxo assume forma de esteira com comportamento turbilhonar, o que difere do esperado pelo CFD. Esse tamanho se mostrou eficiente para a visualização do comportamento do fluido interno, apresentando um comportamento similar às simulações computacionais, sendo possível em todos os casos perceber a visualização dos fenômenos apresentados pelo fluido. Contudo, as paredes com pouca rigidez, devido à espessura do PVC, podem ter influenciado na visualização, pois ocorreu um leve efeito de vibração nestas quando sujeitas ao escoamento.

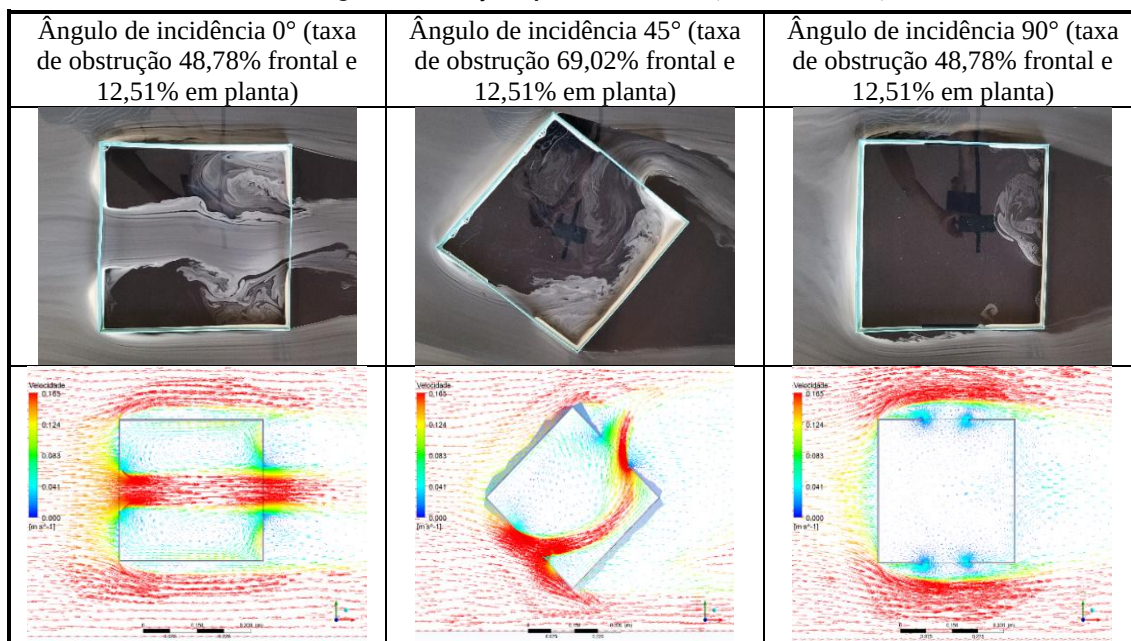
Para o modelo na escala 1:7,5 (Quadro 7), nota-se que internamente, para os ângulos de 0° e 90°, o fluido apresenta ótima conformidade com as simulações e grande facilidade de visualização do comportamento do fluxo de ar. No entanto, para o ângulo de 45°, o comportamento do fluido difere do sugerido pela simulação

CFD e do apresentado nos casos anteriores, podendo verificar recirculação do fluido próximo à saída, o que não é representado nas simulações computacionais. Externamente, os três casos apresentam boa representação do fluido. Apesar da clareza na visualização do fluido que o modelo de menor escala apresenta, a manipulação da maquete, assim como o esquema de captura das imagens, apresenta-se dificultosa por conta de sua grande dimensão.

Quadro 6 - Ensaios na mesa d'água e simulações para o modelo 1, na escala 1:13



Quadro 7 - Ensaios na mesa d'água e simulações para o modelo 1, na escala 1:7,5



Nota-se que a escala do modelo influencia no comportamento do fluido, na facilidade de manipulação do modelo para o ensaio e na captura de imagens. A escala 1:50, apesar de apresentar boa visualização do comportamento do fluido quando comparado à simulação, apresenta dificuldade de estabilidade da maquete no ensaio e manipulação desta, o que pode justificar a diferença do comportamento do fluido em 45° de inclinação. O mesmo ocorre com a escala 1:30, na qual esta apresenta boa visualização do comportamento do fluido interno, mas apresenta dificuldade de movimentação. A escala 1:13 foi considerada a melhor escala para o modelo 1, por apresentar boa relação entre a facilidade de visualização do comportamento do fluido e da manipulação da maquete, o que já não acontece na escala 1:7,5 que apresentou, por conta da grande dimensão das maquetes, dificuldade de posicionamento na mesa, dificuldade de captura das imagens e distorções do comportamento do fluido, quando comparado com o esperado nas simulações.

Análise qualitativa do fluxo de ar para o modelo 2

De forma geral, o comportamento do fluido nos ensaios na mesa d'água apresenta grande semelhança aos resultados das simulações para o modelo com maior complexidade geométrica. Para o caso com ângulo de direção do escoamento igual a 0°, o comportamento de entrada e saída do fluido no interior do modelo segue o mesmo percurso que os casos ensaiados com o ângulo de 45°. O comportamento interno do fluido no ensaio da mesa d'água também se assemelha ao apresentado nas simulações. No entanto, na simulação é possível notar uma convergência dos fluxos no corredor e posterior divisão, o que na mesa d'água é apresentado com outra intensidade. Para o modelo ensaiado com o ângulo de 90°, o comportamento do fluido nos experimentos é similar aos resultados das simulações, sendo que a ausência do fluxo de ar no interior do modelo é representado na mesa d'água pela ausência de espuma, enquanto nas simulações nota-se a presença de vetores internos com baixas velocidades. Nota-se uma semelhança do comportamento do fluido nas duas ferramentas utilizadas. Externamente, o comportamento dos ensaios na mesa d'água para os três ângulos de direção do escoamento está de acordo com o comportamento apresentado nas simulações (Quadro 8).

O modelo 2 na escala 1:50 também apresentou uma visualização dificultada da distribuição do fluido no interior do modelo, pois a pequena dimensão da maquete faz com que o percurso do fluido seja confundido com o depósito de espuma, o que leva a imprecisões na análise (Quadro 8). Externamente, os resultados na mesa d'água não representam com nitidez a separação pela camada limite, nem o início das sombras de vento. Além disso, tem-se dificuldade na manipulação do modelo e o modelo se desloca facilmente na área de ensaios, em função do seu peso reduzido. Com isso, para modelos com escalas maiores, recomenda-se que sejam construídos modelos com materiais mais pesados ou que sejam considerados formas de fixação do modelo na área de seção de ensaio com imãs ou fitas resistentes à água.

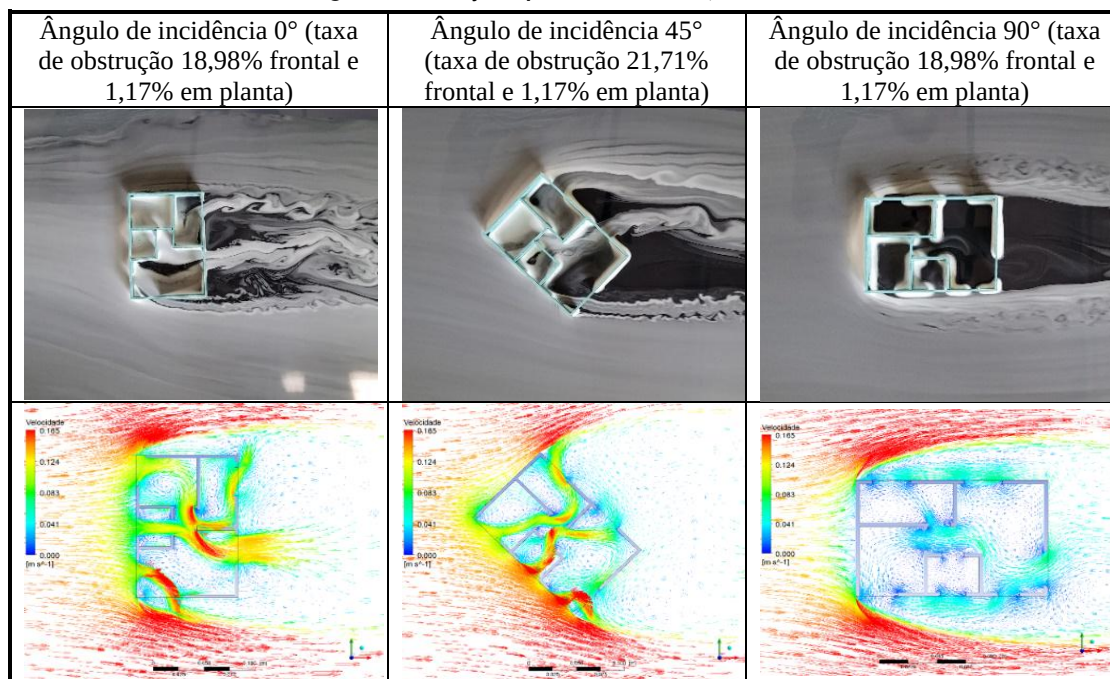
Já o modelo 2 ensaiado na escala 1:30 apresentou boa visualização do comportamento do fluido, facilidade de manipulação do modelo e boa semelhança qualitativa do comportamento do fluido quando comparado com as simulações CFD (Quadro 9). Interna e externamente, é possível observar com nitidez o comportamento que o fluido desenvolve no modelo, ficando visível o percurso no interior, assim como as recirculações. Externamente, os ensaios apresentam semelhança com as simulações computacionais em relação ao efeito de separação e formação de sombras de vento. No entanto, o movimento turbilhonar posterior, que a mesa d'água sugere, não é apresentado nos resultados das simulações.

Por fim, o modelo ensaiado na escala 1:13 possui boa visualização interna do fluido (Quadro 10). Contudo apresenta algumas divergências de comportamento quando comparado com as simulações.

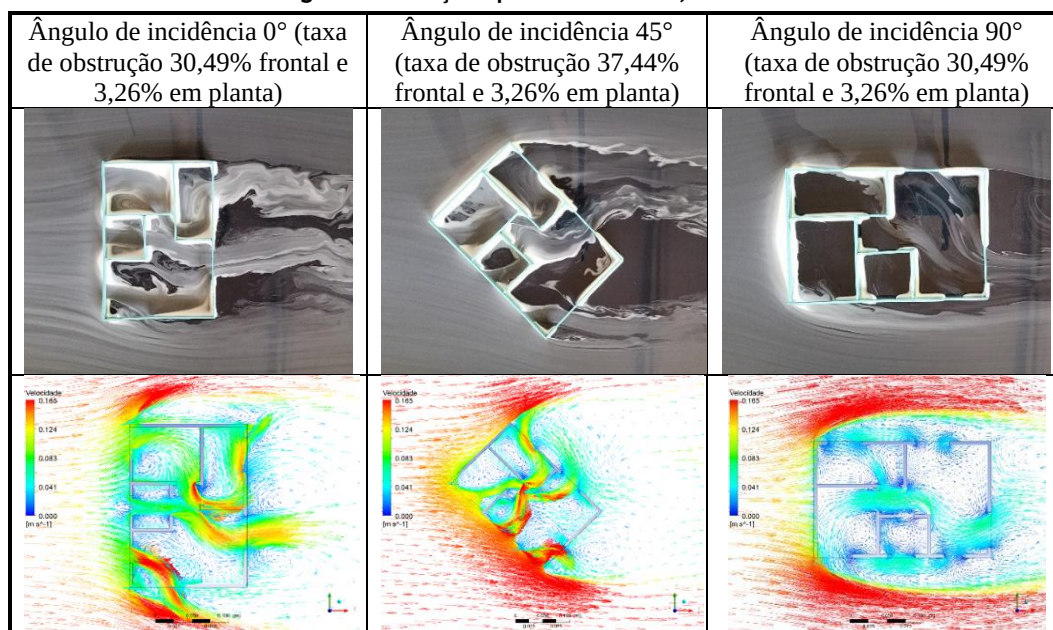
Essas divergências podem ser observadas para o caso de 0° de direção do escoamento, quando o fluido deveria se dividir entre a abertura lateral e frontal, mas só apresenta fluxo para abertura frontal. Já para o caso em que os ventos externos incidem no modelo a 45°, o modelo apresentou o melhor desempenho interno na representação do comportamento do fluido. Externamente o modelo fica bem próximo às laterais da mesa d'água, mas essa localização não apresentou grande influência no comportamento esperado do fluido, que manteve a boa semelhança com o apresentado em simulação computacional.

Assim como o modelo anterior, no modelo 2 a mudança de escala influencia no comportamento do fluido na mesa d'água e na manipulação das maquetes. A escala 1:30 foi a que apresentou melhor visualização do comportamento do fluido, boa semelhança com a simulação e facilidade de manipulação. Já as escalas 1:50 e 1:13 apresentaram distorções do comportamento quando comparadas com as simulações e apresentaram dificuldade de manipulação das maquetes, por conta da dimensão grande e reduzida nas escala 1:13 e 1:50, respectivamente, que geram instabilidade nos ensaios.

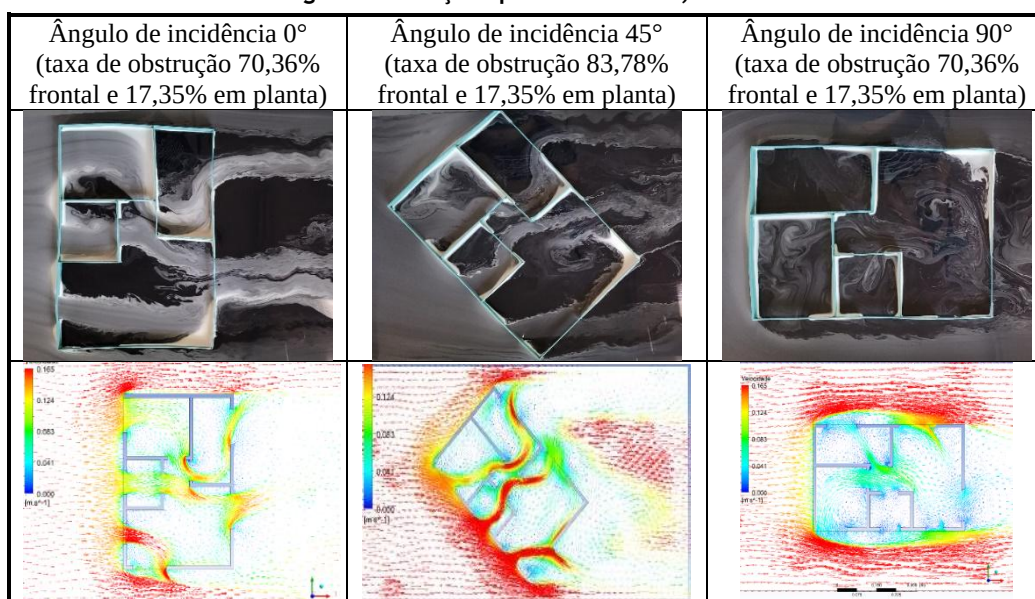
Quadro 8 - Ensaio na mesa d'água e simulações para o modelo 2, na escala 1:50



Quadro 9 - Ensaio na mesa d'água e simulações para o modelo 2, na escala 1:30



Quadro 10 - Ensaios na mesa d'água e simulações para o modelo 2, na escala 1:13



Conclusões

As diferentes taxas de obstrução obtidas com a mudança de escalas dos modelos mostram que, de forma geral, o comportamento do fluido apresentado na mesa d'água nos modelos físicos reduzidos é similar ao apresentado nas simulações computacionais em CFD. Contudo, nas simulações computacionais é visível a diferença de velocidade apresentada conforme a escala se altera, o que não pode ser notado nos ensaios com a mesa d'água.

Além disso, modelos com dimensões reduzidas (escalas 1:50, 1:30 (para modelos simplificado) e 1:50 (para planta de uma Habitação de Interesse Social - HIS) e com taxas de obstrução em planta de 0,28%, 0,78 e 1,17), não proporcionam boa visualização do comportamento do fluido e apresentam dificuldade de manipulação e estabilidade na mesa d'água.

Já os modelos de grande dimensão (escalas 1:7,5 (modelos simplificado) e 1:13 (planta HIS) com taxas de obstrução em planta de 12,51% e 28,14%, apresentam boa visualização do fluido interno. O modelo com taxa de obstrução de 73,13% não representa de forma nítida o comportamento externo, por conta da proximidade com as bordas da mesa. Não obstante, as grandes dimensões apresentam modelos com dificuldade de manipulação e registro de imagens, por necessitarem de grande distância para abrangência completa do modelo. Já os modelos com pequenas dimensões apresentam dificuldade de manipulação do modelo e estabilidade nos ensaios, pois podem ser movimentados pela água e, assim, afetam os resultados. É importante salientar a necessidade de utilização de materiais com rigidez suficiente para evitar deformidades que interfiram na visualização dos resultados.

Conclui-se que os modelos que apresentam melhor desempenho nos ensaios possuem escala próxima ao valor de 1:13 e taxa de obstrução 24,14% frontal e 4,16% em planta, para os casos simplificados e escala 1:30 com taxa de obstrução 30,49% frontal e 3,26% em planta para o modelo de HIS. Entretanto, é importante ressaltar que não é possível determinar uma escala exata para a realização de ensaios, pois a escala irá variar conforme as proporções do modelo a ser estudado. Contudo, é possível avaliar que existem taxas de obstrução que apresentam resultados mais nítidos e facilidade de manipulação das maquetes. Para os ensaios deste artigo, as taxas de obstrução da área de ensaio com melhor desempenho foram entre 12 e 48% para obstrução frontal e 0,70 a 13% para obstrução em planta.

Referências

- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1983.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício**: procedimentos para quantificação. São Paulo, 2006. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 145–158, jan./mar. 2011.
- CUSTÓDIO, M. I. **O potencial da Mesa d'água como ferramenta qualitativa para avaliação da ventilação natural em edificações**. Maringá, 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade estadual de Maringá, 2022.
- CUSTÓDIO, M. I. P.; SHIMOMURA, AL. R. P.; LUKIANTCHUKI, M. A. Visualização analógica da ventilação natural na mesa d'água: avaliação do desempenho por injeção direta. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Tocantins, 2021. **Anais [...]** Tocantins, 2021.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Edusp, 2000.
- FRANKE, J. *et al.* Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN WIND ENGINEERING AND BUILDING AERODYNAMICS, Rhode-Saint-Genève, 2004. **Proceedings [...]** Rhode-Saint-Genève: COST European Cooperation in Science & Technology, 2004.
- FREIXANET, V. A. F.; VIQUEIRA, M. R. **Ventilación natural: cálculos básicos para arquitectura**. Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.
- GIVONI, B. **Man, climate, and architecture**. 2nd. ed. London: Applied Science Publishers, 1976.
- LEITE, R. C. V. **Cidade, vento, energia: limites de aplicação da ventilação natural para o conforto térmico face à densificação urbana em clima tropical úmido**. São Paulo, 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- MATSUMOTO, E.; LABAKI, L. Túnel de vento. In: KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **O processo de projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia**. São Paulo: Singer, 2011.
- MUNDHE, P.; DAMLE, R. M. A methodology for quantifying flow patterns in a water-table apparatus for naturally ventilated buildings. **Architectural Science Review**, v. 64, n. 1/2, p. 1–11, 2020.
- NASCIMENTO, T. C. C.; BARROS, P. C. F.; BATISTA, J. O. N. Avaliação da ventilação natural em arranjos de implantação de edifícios em condomínio de Maceió-al. In: CONGRESSO LUSSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 7., Maceió, 2016. **Anais [...]** Maceió, 2016.
- OLIVEIRA, W. K. *et al.* Como o Brasil pode deter a COVID-19. **Epidemiologia e Serviços de Saúde: Revista do Sistema Único De saúde do Brasil**, v. 29, n. 2, p. e2020044, 2020.
- OMRANI, S. *et al.* Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools. **Building and Environment**, v. 116, p. 182–194, 2017.
- PEREIRA, F. O. R.; TOLEDO, A. M. Visualização analógica da ventilação natural pela ação do vento em edifícios residenciais na mesa d'água. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 10., São Paulo, 2004. **Anais [...]** São Paulo, 2004.
- RIBEIRO, P. V. S.; BITTENCOURT, L. S. Contribuição da mesa d'água na análise da geometria de sheds extratores e captadores de ar para ventilação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., São Paulo, 2016. **Anais [...]** São Paulo, 2016.
- RISTIC, S. Flow Visualization techniques in wind tunnels: part I: non optical methods. **Scientific Technical Review**, v. 57, n. 1, p. 39–50, 2007.
- ROSSI, M. M. *et al.* A mesa d'água como ferramenta de apoio para a caracterização de um modelo genérico a ser ensaiado em túnel de vento. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 3, n. 10, 2019.
- ROSSI, M. M. *et al.* Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural. **Libro de Artículos**, p. 107–114, 2018.
- ROYAN, M. E.; VAIDYA, P.; MUNDHE, P. Teaching natural ventilation using water table apparatus: a classroom teaching, simulation and design tool. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 34., Hong Kong, 2018. **Proceedings [...]** Hong Kong, 2018.

ROYAN, M.; VAIDYA, P. Construction, validation and testing of a water table for natural ventilation analysis. **Energy and Buildings**, v. 226, p. 110356, 2020.

SARVEZUK, L. C. **Análise bioclimática em projetos de Habitação de Interesse Social**: contribuições ao zoneamento bioclimático brasileiro – ZB3. Maringá, 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade estadual de Maringá, Maringá, 2020.

TOLEDO, A. M.; LAURENTINO, N. Análise da ventilação natural em apartamentos reversíveis por meio de ensaios analógicos na mesa d'água. **Nutau**, v. 1, 2010.

TOLEDO, A. M.; PEREIRA, F. O. R. O potencial da Mesa d'água para a visualização analógica da ventilação natural em edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., Curitiba, 2003. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2003.

XAVIER, A. C. de A. *et al.* Visualização da ventilação natural em ensaios na mesa d'água comparado a simulações computacionais. **PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. 1–16, 2020.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de estudos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Maria Isabel Pedrosa Custódio

Conceitualização; Curadoria de dados; Análise de dados; Recebimento de financiamento; Pesquisa; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Redação do manuscrito original.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Maringá | Av. Colombo, 5790, Zona 7 | Maringá - PR - Brasil | CEP 87020-900 | Tel.: (44) 99728 5201 | E-mail: mariaisabelpedrosacustodio@gmail.com

Cesar Imai

Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura | Universidade Estadual de Londrina | Rod. Celso Garcia Cid (PR-445), Km 380 | Londrina - PR - Brasil | CEP 86051-990 | Tel.: (44) 3371-4535 | E-mail: cimai@uel.br

Fernando Vitor Marques da Silva

Validação de dados e experimentos; Metodologia; Supervisão; Redação - revisão e edição.

Departamento de Estruturas | Laboratório Nacional de Engenharia Civil | Av. do Brasil, 101 | Lisboa - Portugal | 1700-066 | Tel.: +351 (21) 844-3862 | E-mail: fms@lnec.pt

Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Conceitualização; Análise de dados; Validação de dados e experimentos; Metodologia; Supervisão; Redação - revisão e edição.

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-080 | Tel.: (11) 3091-4681 - ramal 213 | E-mail: arprata@usp.br

Marieli Azoia Lukiantchuki

Conceitualização; Análise de dados; Pesquisa; Validação de dados e experimentos; Administração do projeto; Disponibilização de ferramentas; Supervisão; Metodologia; Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Maringá | Tel.: (44) 9707-2211 | E-mail: malukiantchuki2@uem.br

Editor do artigo: **Enedir Ghisi**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.