

UMA FERRAMENTA BASEADA EM CFD PARA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL

Fabio Kenji Motezuki (1); Liang-Yee Cheng (2)

(1) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
fabio.motezuki@poli.usp.br

(2) Dr. Eng., Professor do Departamento de Engenharia de Construção Civil, cheng.yee@poli.usp.br
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, LabCAD,
Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, n. 83, Cidade Universitária – São Paulo –SP, 05508-900
Tel.: (11) 3091 5438

RESUMO

A demanda por programas de simulação tem crescido junto com a preocupação com o consumo sustentável de energia, a busca pela eficiência energética e a tendência no uso de normas de desempenho. Porém a maior parte destes programas, apesar de serem relativamente completos do ponto de vista das formulações possíveis de serem utilizadas, está muito distante da realidade dos escritórios de engenharia e arquitetura, onde o pragmatismo, a cultura e a falta de pessoal qualificado no setor inviabilizam o uso destes programas em projetos de pequenas habitações. Neste trabalho foi implementada uma ferramenta computacional com base na dinâmica de fluidos computacional (CFD) que procura suprir não só a adaptação do sistema quanto aos requisitos da indústria da construção civil como também o desenvolvimento de massa crítica nesta área do conhecimento. A validação do sistema foi efetuada por comparação com resultados numéricos e experimentais obtidos por outros autores, mostrando uma boa concordância entre eles. Como forma de aproximar o uso dos simuladores computacionais das necessidades de engenheiros e arquitetos, procurou-se utilizar um índice de ventilação setorizado para apresentar os resultados computacionais de modo a facilitar a interpretação do fenômeno sem que se perca a relação entre o fenômeno físico da ventilação e o índice.

Palavras-chave: simulação computacional, ventilação natural, CFD.

ABSTRACT

The demand for simulation programs has increased with the the concerns about sustainable consumption of energy, the search for energy efficiency and the tendency in the use of performance standards. However, great part of these programs, although relatively complete in terms of formulation, is far from the reality of engineering and architecture offices, where the culture, the pragmatism and the lack of qualified staff in the sector prevents the use of these programs on design of small dwellings. A computational tool based on computational fluid dynamics (CFD) was implemented in this study, to meet not only the adaptation of the system to the requirements of civil construction industry as well to develop critical mass in this area of knowledge. The validation of the system was performed by comparison with numerical and experimental results obtained by other authors, showing a good agreement between them. As a way of approaching the use of computational simulations to the needs of engineers and architects, was tried to use a sectorized ventilation index to present the computational results and to make easy the interpretation of the ventilation without losing focus on the relation of physical phenomenon and the index.

Keywords: computer simulation, natural ventilation, CFD.

1. INTRODUÇÃO

Desde eras remotas a ventilação natural vem sendo utilizada de forma intuitiva e empírica nas habitações. Sabe-se que a ventilação natural, onde é possível de ser utilizada, fornece inúmeras vantagens sobre os sistemas de condicionamento de ar, dentre elas a constante renovação do ar interior da edificação e a remoção de poluentes, umidade e calor, melhorando a qualidade do ar interno e auxiliando no conforto térmico.

A busca por eficiência energética associada ao uso cada vez maior de normas de desempenho para as edificações vem aumentando a demanda por programas de simulação, que são meios mais econômicos do que o uso de modelos reduzidos para averiguar o desempenho frente aos requisitos (MACDONALD; REARDON, 2007).

Neste trabalho foi utilizado o algoritmo *Solution Algorithm for Transient Fluid Flows* (SOLA) proposto por Hirt et al. (1975), adaptado para o uso no estudo da ventilação. Também foi utilizado um método algébrico de simulação da turbulência proposto por Chen e Xu (1998) que, apesar de não ter a mesma precisão dos métodos de duas equações, prima por ter sido calibrado para o uso em ambientes similares aos cômodos de uma casa e por consumir bem menos recursos computacionais para sua execução devido à simplicidade da formulação.

A validação do simulador implementado foi feita comparando os resultados obtidos da simulação de um caso de teste típico de escoamento ao redor de um cubo sobre uma superfície, com os obtidos por outros autores utilizando métodos experimentais e outros métodos numéricos.

O escoamento ao redor de um cubo é um caso bem conhecido e tem considerável importância para a Engenharia Civil, uma vez que diversos tipos de escoamentos enquadram-se nesta mesma categoria como, por exemplo, a análise de pressões sobre as fachadas e telhado de uma edificação e a análise da dispersão de poluentes. A Figura 1 mostra os vórtices que se formam neste tipo de escoamento e que podem mudar a forma e tamanho proporcionalmente a velocidade do escoamento.

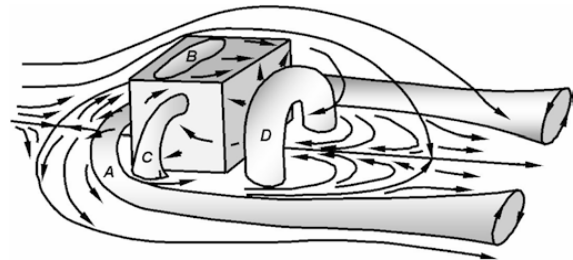


Figura 1 – Estruturas vorticais no escoamento ao redor de um cubo.

Fonte: Sousa (2002)

Castro e Robins (1977) executaram um experimento onde foram medidas as pressões nas superfícies de um cubo em um túnel de vento com seção transversal da região de medição de 2,7 x 9,1 m e fluxo incidente uniforme ou turbulento. No escoamento turbulento foi medida uma camada limite 2 m e o cubo utilizado nas medições tinha 200 mm.

Ayad (1999) utilizando um programa de CFD bidimensional e *Large Eddy Simulation* (LES) como modelo de turbulência efetuou suas simulações para o caso com fluxo incidente turbulento. Baseando-se nestas premissas, foi assumida uma camada limite para o fluxo incidente utilizando uma aproximação por potência de 1/7 da velocidade U até uma altura igual a duas vezes o comprimento da aresta do cubo, conforme a equação (1).

$$\begin{aligned} U(Z) &= U_{\infty} (Z/2h)^{1/7} \text{ para } Z < 2h \\ U(Z) &= U_{\infty} \text{ para } Z \geq 2h \end{aligned} \quad (1)$$

Utilizando este simulador, foi avaliada a proposta de uso de um índice de ventilação para simplificar a análise do fluxo de ar em um ambiente.

A Federação das Associações Européias de Aquecimento e Condicionamento de ar (REHVA) propõe em seu livro de diretrizes para eficácia da ventilação dois índices (MUNDT et al., 2004):

- Eficácia na remoção de contaminantes (*Contaminant Removal Effectiveness* – CRE)
- Eficácia na troca de ar (*Air Change Effectiveness* – ACE)

A eficácia na remoção de contaminantes, equação (2), é dada por uma relação de concentrações no ambiente e na saída, ou no exaustor. Quanto maior essa relação maior a eficácia do sistema de ventilação na remoção de contaminantes no ambiente analisado, sendo que um resultado satisfatório é atingido quando a concentração de contaminantes dentro do ambiente é menor do que na saída, ou seja a remoção é feita antes do espalhamento dentro do ambiente. Este índice é melhor empregado quando se conhece os locais geradores de contaminantes.

$$CRE = \frac{\text{concentração na saída}}{\text{concentração média na sala}} \quad (2)$$

A concentração na saída pode ser comparada com a concentração em pontos específicos do ambiente gerando o índice local de qualidade do ar.

A eficácia na troca de ar, equação (3), relaciona o tempo de troca de ar de um ambiente com o menor tempo possível de troca de ar para este ambiente, que é o tempo gasto para a troca de ar num fluxo tipo pistão, quando o ar entra por uma extremidade do ambiente e flui através dele empurrando ar contaminado para a exaustão no outro lado do ambiente. Este índice é melhor empregado no estágio de projeto, quando o leiaute do ambiente ainda não é definido.

$$ACE = \frac{\text{menor tempo possível de troca de ar}}{\text{tempo de troca de ar}} \quad (3)$$

O menor tempo possível de troca de ar pode ser comparado com o tempo que o ar de entrada leva para chegar a um ponto do ambiente, gerando assim o índice local de troca de ar.

Apesar da indicação para utilização destes índices somente para ambientes com aberturas ligadas exclusivamente ao ambiente externo, estes índices podem ser adaptados, com o uso de programas de simulação, para ambientes internos, interconectados e mais complexos. Os índices recomendados por Mundt et al. (2004) serviram como referência para a proposição de um novo índice de ventilação, mais voltado ao escoamento do ar. Este índice, que foi denominado “velocidade média modular”, refletiu bem o escoamento de ar dentro do ambiente estudado, permitindo assim fazer uma avaliação qualitativa do projeto.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar uma ferramenta computacional desenvolvida pelos autores para o estudo da ventilação natural em 3D e propor o uso de índices de ventilação para a análise dos resultados obtidos por simulação computacional.

3. MÉTODO

O método de estudo é dividido em duas etapas:

1. Implementação e validação do programa de simulação.
2. Elaboração de um índice de ventilação para a análise dos dados de simulação

3.1. Implementação do programa de simulação

A ventilação, assim como o fluxo de outros gases e líquidos, é governada pelas equações de conservação de massa, Equação (4), e de momento, Equação (5).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\rho \partial x} + \nu \nabla^2 u + g_x + \frac{f_x}{\rho} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\rho \partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y + \frac{f_y}{\rho} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial P}{\rho \partial z} + \nu \nabla^2 w + g_z + \frac{f_z}{\rho} \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

u, v, w são as componentes da velocidade
 x, y, z são as componentes de posição

P é a pressão [Pa]

ρ é a densidade (neste trabalho será utilizada a densidade do ar $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$)

$\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática (utilizado $\nu_{ar} = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

g_x, g_y, g_z é a força gravitacional na direção x, y e z respectivamente [m/s^2]

f_x, f_y, f_z são as forças externas na direção x, y e z respectivamente [N]

Estas equações são discretizadas no espaço e no tempo de modo que possam utilizados métodos numéricos de solução. A discretização no espaço se dá pela divisão por meio de uma malha estruturada retangular da qual resulta em paralelepípedos onde as velocidades são calculadas nas faces do paralelepípedo e a pressão é calculada no centro, conforme a Figura 2.

A discretização no tempo é feita pela divisão deste em pequenos passos de tempo, chamados de *time-steps*, para os quais as equações são calculadas.

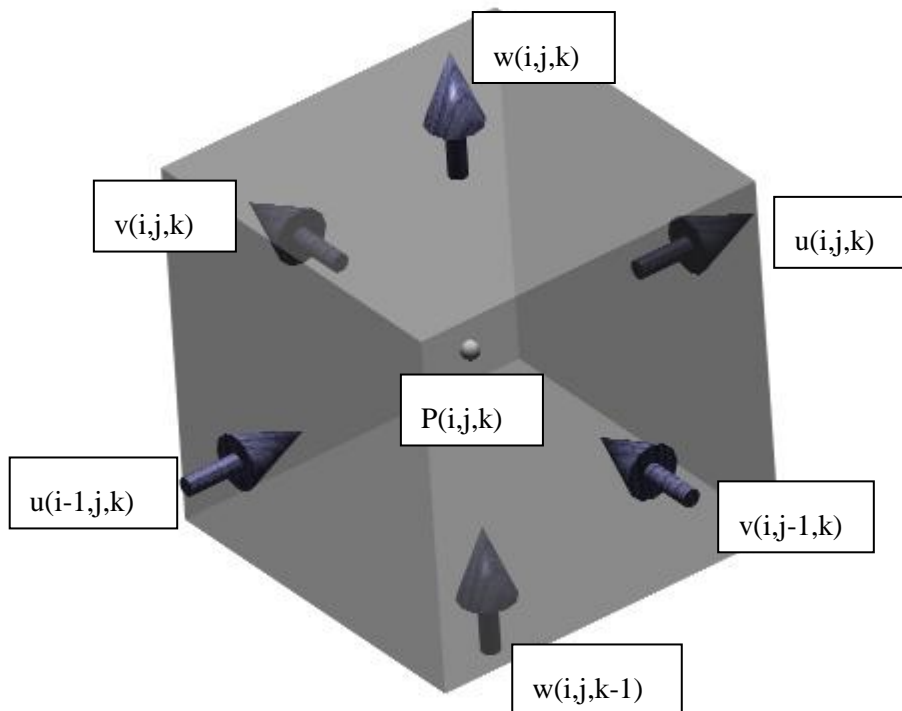


Figura 2 – Posicionamento das variáveis discretizadas em relação a malha

A condição de contorno de parede é simulada por meio do uso da técnica de reflexão das velocidades, esta técnica consiste em utilizar a velocidade anteriormente calculada dentro do domínio computacional para simular uma condição de escoamento perto da parede impondo uma velocidade auxiliar, setas em vermelho na Figura 3.

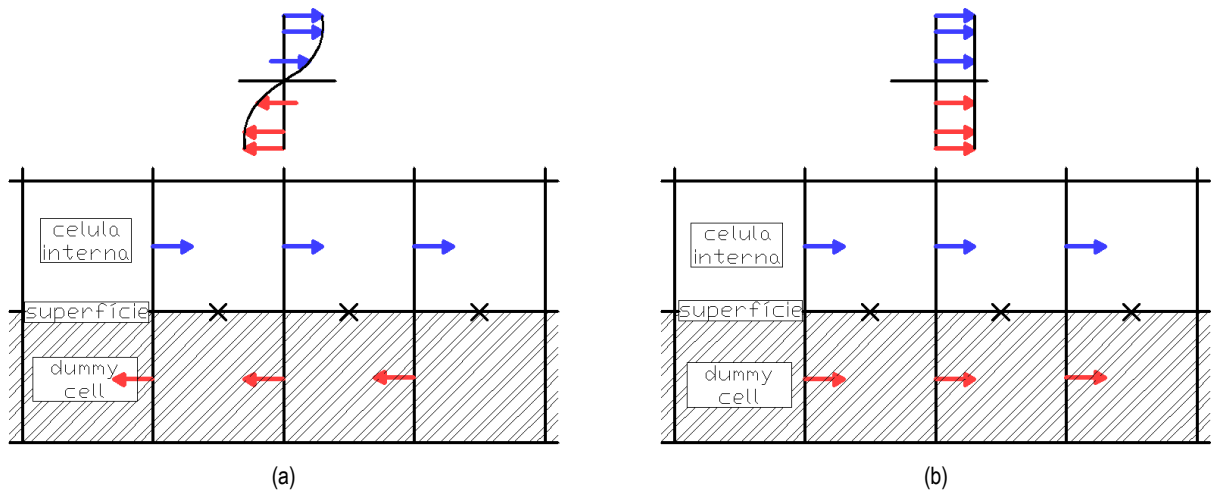


Figura 3 – Condição de contorno de parede para escoamento viscoso (a) e escoamento invíscido (b)

A condição de contorno para o fluxo de entrada de ar é simulada pela imposição de velocidades na fronteira de entrada, Figura 4a.

A saída de fluxo é simulada utilizando a condição de continuidade, ou seja, as velocidades simuladas são extrapoladas para fora do domínio de simulação provocando uma condição de invariância das condições na fronteira de saída, Figura 4b.

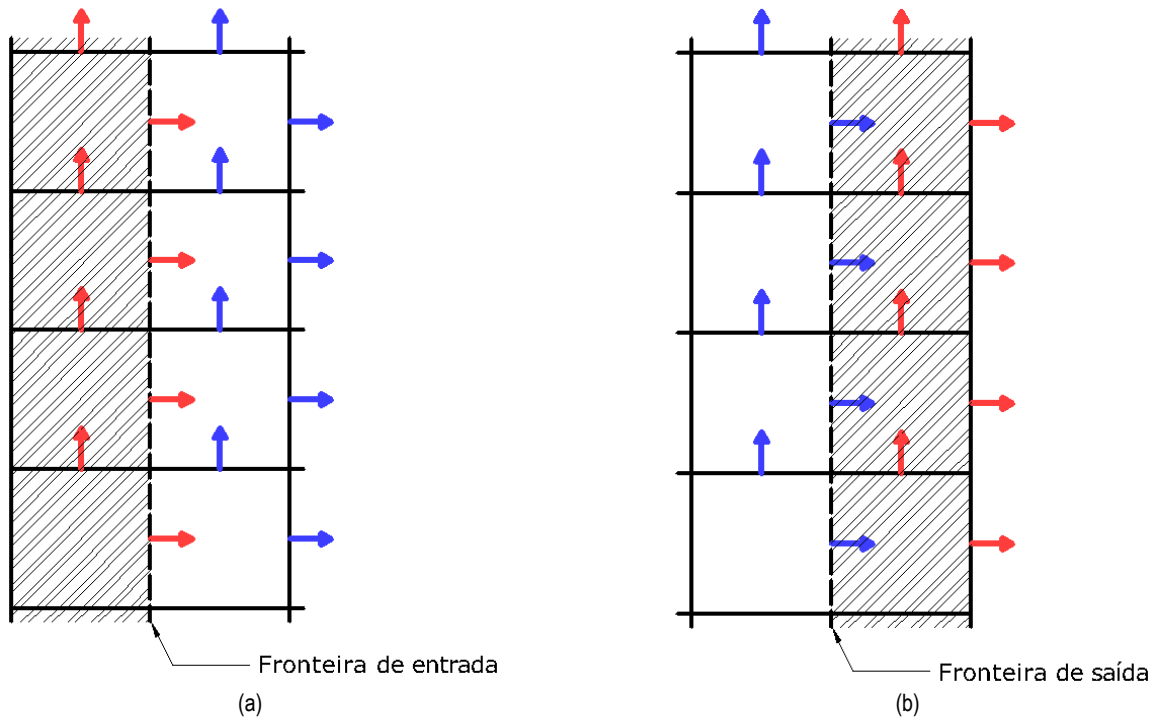


Figura 4 – Condição de contorno para as fronteiras de entrada (a) e fronteira de saída (b)

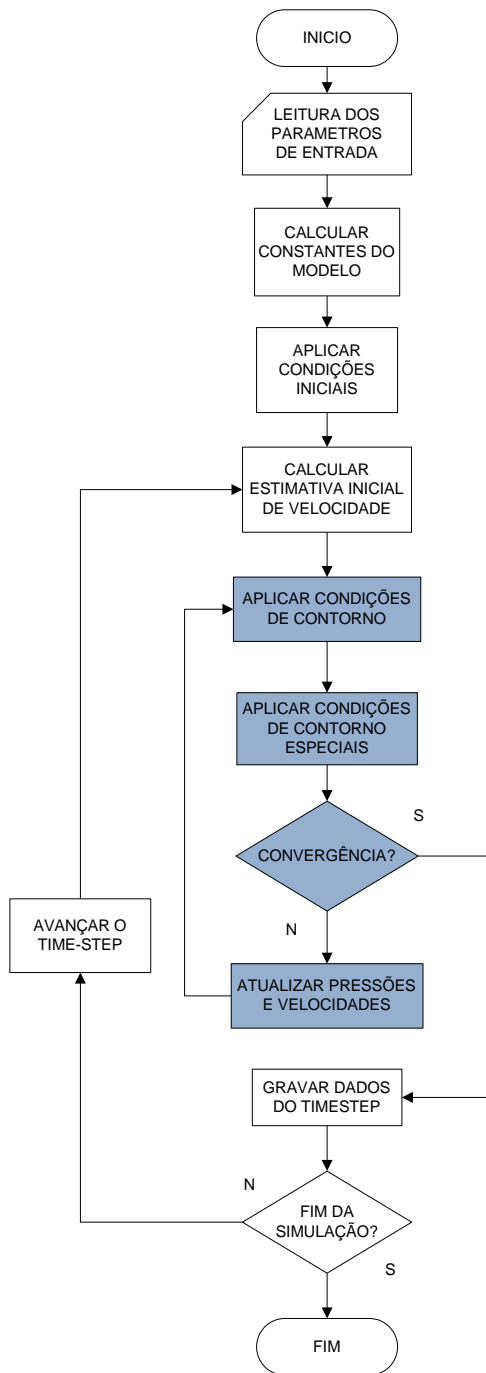


Figura 5 – Fluxograma do método SOLA

Para o foco deste trabalho os efeitos da temperatura do ar na ventilação natural não foram considerados, devido à predominância dos efeitos convectivos em relação aos efeitos de flutuação (“*buoyancy*”).

Para as simulações feitas neste trabalho foi utilizado o método SOLA para escoamentos incompressíveis proposto por Hirt et al. (1975). Este método é conceitualmente semelhante ao método Mark And Cell (MAC), descrito por Harlow e Welch (1965), onde primeiramente é feito um cálculo explícito das equações de momento, equação (5), de forma a se obter uma estimativa das velocidades, em seguida é feito o ajuste de pressão e velocidade para garantir que a equação de conservação de massa, equação(4), seja respeitada. No SOLA a principal diferença é que a etapa de ajuste de pressão e velocidade é feita de modo iterativo por meio de sobre-relaxações sucessivas (SOR), este processo facilita o tratamento das condições de fronteira (FORTUNA, 2000). A etapa iterativa é destacada em azul na Figura 5.

3.2. Índice de ventilação para a análise dos dados de simulação

Givoni (1962) fez medições da velocidade do vento em salas com diversas configurações de aberturas para entrada e saída de ar, de modo que foram mapeadas as velocidades médias cobrindo todo o modelo. Com base nestas medições, analisou a influência do posicionamento das aberturas e sua dimensão na ventilação dentro do ambiente.

Baseado no trabalho de Givoni (1962), Motezuki et al. (2005) propuseram um índice para análise da ventilação relacionando a velocidade do ar na abertura de entrada com a velocidade média calculada dentro de uma determinada região do ambiente. Este índice será referido por velocidade média modular sendo calculado conforme a equação abaixo.

$$\bar{V} = \frac{|\text{velocidade média no ambiente}|}{|\text{velocidade na abertura de entrada de ar}|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2}}{n|V_r|} \quad (6)$$

Onde:

\bar{V} é a velocidade média modular;

u_i, v_i, w_i são as componentes da velocidade em um ponto i ;

V_r é uma velocidade de referência, adotada a velocidade na entrada de ar;

n é a quantidade de seções.

Utilizando este índice também é possível efetuar uma análise local pela determinação da velocidade média modular representativa de um volume da sala em relação à velocidade na abertura de entrada, conceito este que foi aplicado no estudo da ventilação no interior de uma sala.

Escolheu-se a configuração de aberturas da Figura 6 para efetuar a comparação entre os resultados obtidos por meio do índice de ventilação proposto e os resultados experimentais de Givoni (1962), sendo que a abertura de entrada tem dimensão de 1/3 da largura da parede e as aberturas de saída são simétricas e a soma de suas larguras equivale a 1/3 da largura da parede, suas dimensões são de 64x64x50 cm e a velocidade de entrada de ar na simulação de 1m/s.

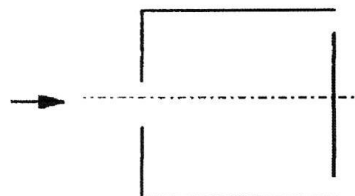


Figura 6 – Configuração em planta de aberturas e paredes utilizada como base para a análise dos efeitos 3D

A Figura 7 mostra o modelo experimental utilizado por Givoni (1962). A construção das paredes com seis placas verticais de igual tamanho permite a mudança da configuração das aberturas para a configuração desejada. As dimensões do modelo são de 65x65x50cm e as aberturas na configuração apresentada na figura têm largura de 1/3 da largura do cubo e altura de 1/3 da altura do cubo.

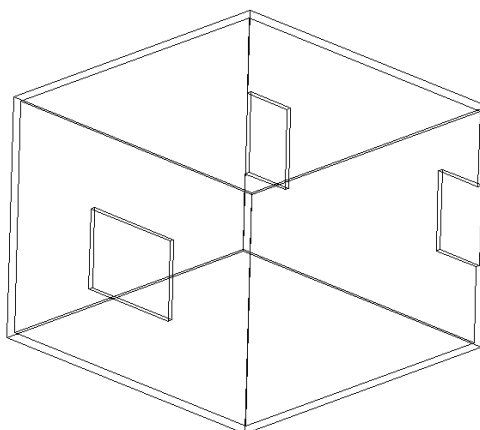


Figura 7 – Modelo utilizado por Givoni (1962) em túnel de vento

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Validação por escoamento ao redor de um cubo

Para o cálculo 3D o domínio de simulação foi discretizado usando uma malha estruturada retangular de 120 x 70 x 40 com um espaçamento regular de $\Delta x = \Delta y = h/10$, onde h é o lado do cubo. O *time-step* adotado é de $\Delta t = 0,01s$ e os primeiros 4 segundos da simulação são utilizados para o aumento gradual da velocidade de incidência do vento.

Em uma primeira análise, avaliando qualitativamente o campo de velocidades obtido no plano de simetria na versão 3D, comparado com o campo obtido por Ayad (1999) utilizando LES e apresentados na Figura 8, o caso simulado apresenta uma boa aproximação na determinação dos vórtices no topo e na face de jusante do cubo.

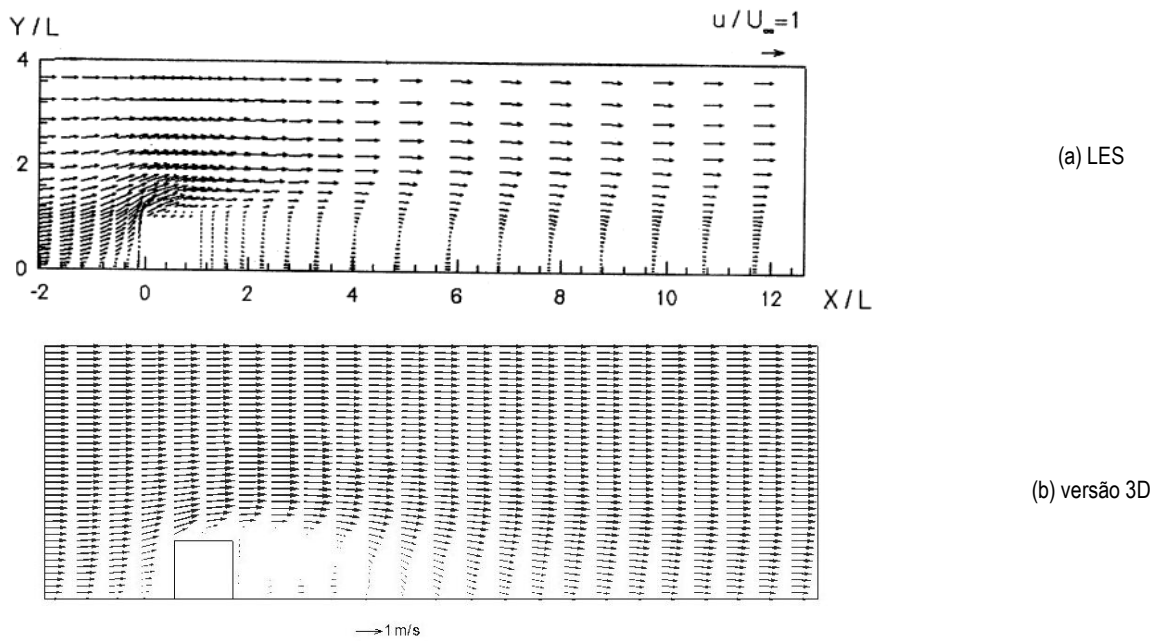


Figura 8 – Comparação entre campos de velocidade obtidos pelo cálculo 2D com LES (AYAD, 1999) (a) e cálculo 3D do programa implementado (b)

A Figura 9 mostra uma comparação entre os perfis de pressão na face de barlavento obtidos experimentalmente (CASTRO; ROBINS, 1977), por simulação LES 2D (AYAD, 1999) e pela versão 3D do programa implementado.

O programa tridimensional com modelo de turbulência de zero-equações apresentou uma melhor aproximação do que o método bidimensional, com relação aos resultados experimentais de Castro e Robins (1977).

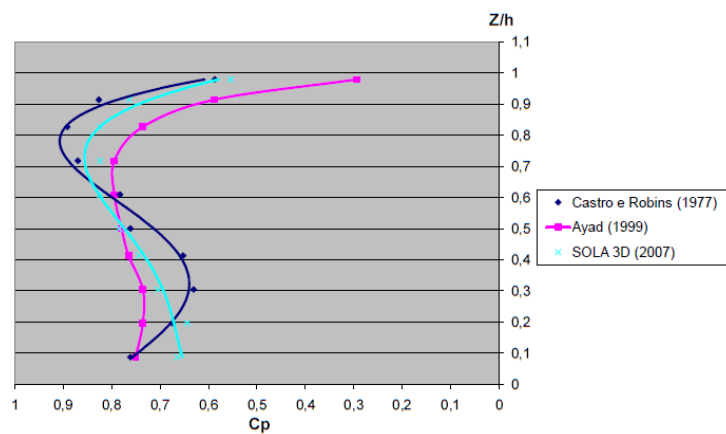


Figura 9 – Coeficientes de pressão para os casos simulados

4.2. Ventilação interna a uma sala

A mostra os resultados computacionais obtidos utilizando o modelo 3D, as dimensões estão acordo com o modelo utilizado no experimento em túnel de vento.

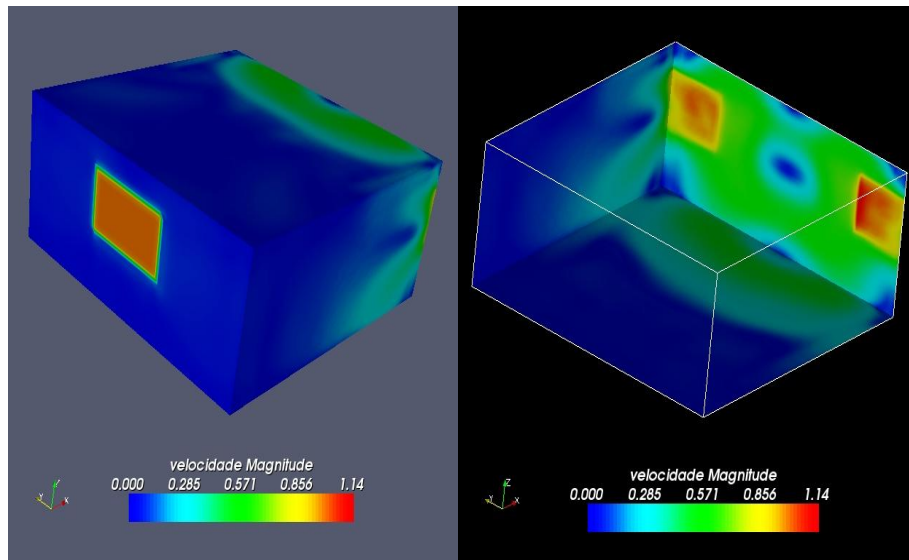


Figura 10 – Modelo tridimensional simulado, entrada de ar a 1m/s pela abertura centrada em uma das faces, as saídas de ar têm a mesma altura e área equivalente à abertura de entrada.

Os números na Figura 11a mostram a velocidade média modular calculada desde o piso até o teto para uma determinada região vista em planta. Na Figura 11b considera-se a mesma seção quadrada no cálculo, porém somente até a altura de 1,8m definida como a zona ocupada, ou seja, onde as pessoas estarão desempenhando suas funções do dia a dia enquanto que na área acima dela é uma zona onde geralmente não há atividade humana e, portanto tem um peso bem menor no estudo da ventilação para conforto.

Ressalta-se que os valores obtidos por Givoni (1962) foram medidos utilizando anemômetros de fio quente dentro de um modelo reduzido e, devido à constituição física do aparato, as medições podem ser consideradas como uma velocidade média dentro da área de medição de cada anemômetro, enquanto que os valores obtidos pelo modelo computacional representam a velocidade média do ar calculada em cada volume. Tendo em vista a diferença na definição dos valores obtidos por medição e por simulação, é de se esperar que os valores não sejam exatamente iguais e a comparação entre os resultados obtidos pelas duas abordagens tem como objetivo primordial a validação qualitativa da ferramenta computacional.

Comparando com os valores observados por Givoni (1962) na Figura 11c, é possível observar que experimentalmente se obteve um maior espalhamento da corrente de ar. Esta diferença no espalhamento pode ser atribuída à menor difusão devido ao modelo de escoamento turbulento adotado. No entanto para os valores de velocidade média modular próxima da abertura de entrada e das aberturas de saída da Figura 11a e Figura 11b é notável a proximidade com os valores de velocidade média obtidas por Givoni (1962) na Figura 11c.

0,08	0,11	0,14	0,27	0,53
0,28	0,30	0,34	0,45	0,61
0,63	0,66	0,72	0,77	0,69
0,24	0,26	0,30	0,42	0,59
0,09	0,12	0,16	0,29	0,56

diferença menor que 10%
diferença entre 10% e 20%
diferença maior que 20%

(a)

0,07	0,10	0,14	0,32	0,52
0,22	0,26	0,33	0,47	0,61
0,47	0,49	0,58	0,68	0,69
0,20	0,23	0,30	0,44	0,58
0,08	0,11	0,16	0,34	0,55

diferença menor que 10%
diferença entre 10% e 20%
diferença maior que 20%

(b)

0,24	0,21	0,32	0,34	0,44
0,35	0,29	0,23	0,22	0,23
0,65	0,35	0,29	0,27	0,34
0,39	0,23	0,24	0,20	0,24
0,25	0,21	0,44	0,57	0,57

(c)

Figura 11 – Velocidade média considerando toda seção da edificação (altura total) (a), Velocidade média considerando apenas a zona ocupada (até 1,8m) (b), Velocidades observadas por Givoni (1962) (c)

Ainda utilizando os resultados da Figura 11, tomou-se apenas um dos lados simétricos da sala e os resultados de velocidade média modular foram confrontados com os obtidos por simulação 2D de Motezuki et al. (2005).

Da comparação na Figura 12, verifica-se que a tridimensionalidade da ventilação de uma sala, não permite simplificar o problema para duas dimensões e este fato se reflete na velocidade média modular que é menor na análise 3D. Isto ocorre principalmente pelo fato de que em um ambiente 3D das aberturas são limitadas tanto em largura quanto em altura o que não ocorre no 2D.

0,160	0,556	0,648
0,156	0,383	0,728
0,911	1,076	0,745

2D

0,087	0,159	0,449
0,082	0,172	0,466
0,601	0,659	0,715

3D altura total

0,080	0,168	0,467
0,074	0,200	0,470
0,454	0,566	0,692

3D zona ocupada

Figura 12 – Comparação das velocidades médias modulares entre os casos 2D (MOTUZUKI et al., 2005) e 3D.

5. CONCLUSÕES

Apesar das limitações do simulador quanto aos usos possíveis, ele fornece resultados compatíveis com os publicados por outros autores, servindo para a avaliação qualitativa do fluxo de ar dentro do ambiente.

A avaliação qualitativa do fluxo de ar permite fazer uma análise comparativa dos desempenhos das alternativas de projeto, podendo contribuir para a melhora da qualidade deste.

A velocidade média modular representa relativamente bem o fluxo de ar dentro do ambiente sendo possível utilizá-la em uma análise qualitativa do fluxo de ar, na sugestão de configurações de aberturas para projeto e no auxílio da tomada de decisões quanto à adequação da configuração de aberturas para a ventilação proposta pelo projetista dentre outras possíveis aplicações.

6. REFERÊNCIAS

- AYAD, S. S. Computational study of natural ventilation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 82, n. 1-3, p. 49-68, 1999.
- CASTRO, I. P.; ROBINS, A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v.79, n. 2, p. 307-335, 1977.
- CHEN, Q.; XU, W. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 2, p. 137-144, 1998.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**: Conceitos básicos e aplicações. São Paulo: Edusp, 2000. 426 p.
- GIVONI, B. **Basic study of ventilation problems in housing in hot countries**: Final report, sponsored by the Ford foundation. Haifa Technion – Building Research Station, Israel Institute of Technology, 1962.
- HARLOW, F. H.; WELCH, J. E. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. **Physics of Fluids**, v. 8, n. 12, p. 2182-2189, 1965.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D.; ROMERO, N. C. **SOLA – A numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows**, LA-5852, Los Alamos Scientific Laboratory, 1975.
- MACDONALD, I. A.; REARDON, J. T. Quantifying the performance of natural ventilation. In: Building Simulation, 2007, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing: IBPSA, 2007. p. 1007-1012.
- MOTUZUKI, F. K.; CHENG, L.-Y.; PIPINEL, E. A. R. Análise computacional da influência das aberturas na ventilação cruzada. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005, **Anais...** Maceió, ENCAC-ELACAC 2005. CD-ROM.
- MUNDT, E. (Ed.); MATHISEN, H. M.; NIELSEN, P. V.; MOSER, A. **Ventilation effectiveness**: REHVA Guidebook nº2. 2004. 74p.
- SOUSA, J. M. M. Turbulent flow around a surface-mounted obstacle using 2D-3C DPIV. **Experiments in Fluids**, v. 33, p.854-862, 2002.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.