FABIO KENJI MOTEZUKI

UM ESTUDO SOBRE A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA
VENTILAÇÃO CRUZADA EM HABITAÇÕES E SUA APLICAÇÃO NO
PROJETO ARQUITETÔNICO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2009

FABIO KENJI MOTEZUKI

UM ESTUDO SOBRE A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA
VENTILAÇÃO CRUZADA EM HABITAÇÕES E SUA APLICAÇÃO NO
PROJETO ARQUITETÔNICO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil e
Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Cheng Liang-Yee

São Paulo
2009

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e à minha amada que
compartilham comigo todos os
momentos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar e guiar meus passos e por ter sido a sustentação nestes anos de estudo, que resultaram neste trabalho.

Ao professor Cheng Liang-Yee, por ter me apoiado neste trabalho, pelos conhecimentos transmitidos e pela orientação exemplar, meu sinceros agradecimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

À Prof^a. Dr^a. Lucia Helena de Oliveira e Prof^a.. Dr^a. Rosana Caram pelo apoio e pelas contribuições feitas no aperfeiçoamento deste trabalho.

À Fátima R. Gonçalves e Denise F. S. Alves, da Secretaria de Pós-Graduação pela atenção proferida.

Agradeço aos meus pais, Hahadime e Kazuko, pelo amor, apoio e incentivo que sempre me dedicaram e pela educação que hoje faz parte de minhas fundações para superar degraus cada vez mais altos.

Agradeço à Giordana, minha amada companheira que compartilhou momentos de alegria e dificuldade no desenvolvimento deste trabalho, por sua compreensão nos momentos de ausência.

À Cecília Umetsu do Nascimento pelo incentivo e apoio transmitidos e aos amigos e colegas do curso de engenharia da Escola Politécnica, que em todos os momentos tinham uma palavra de incentivo.

Aos amigos, colegas e professores do LabCAD pelo apoio, amizade e incentivo mútuo.

Das pequenas coisas da vida
tiramos as maiores lições que a
humanidade pode imaginar

RESUMO

Nos últimos anos, devido à crescente preocupação com a sustentabilidade, foram despendidos mundialmente grandes esforços para a redução do consumo de energia pelos sistemas prediais. Em países tropicais como o Brasil, a ventilação natural é uma maneira efetiva e econômica para melhorar o conforto térmico dentro de habitações. Ela contribui para diminuir o uso do condicionamento de ar e renovar o ar da edificação, ajudando a reduzir as chances de se ter a Síndrome do Edifício Doente (*Sick Building Syndrome* – SBS) e melhorando a qualidade do ar interno (*Indoor Air Quality* – IAQ). Para tirar proveito destas vantagens da ventilação natural, o comportamento do fluxo de ar dentro da edificação deve ser analisado considerando o clima local. Existem diversos códigos computacionais baseados na Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) que podem ser utilizados para esta finalidade, no entanto, o CFD é um campo que requer conhecimentos altamente especializados e experiência prática para se obter bons resultados e este conhecimento geralmente está além da formação da maioria dos engenheiros e arquitetos. Com base nas dificuldades listadas e na necessidade de complementar a formação de engenheiros e arquitetos nesta área do conhecimento, este trabalho está focado em dois objetivos: o primeiro é implementar um simulador numérico computacional baseado no algoritmo *Solution Algorithm for Transient Fluid Flows* – SOLA e as condições de contorno necessárias para a simulação da ventilação, sendo que a validação do simulador foi realizada por comparação com resultados numéricos e experimentais existentes na literatura. O segundo objetivo é propor uma ferramenta prática para a análise da ventilação natural na fase de projeto, com uma abordagem baseada na teoria de sistemas nebulosos, para identificar as melhores configurações de aberturas para um dado leiaute. Para isto, adotou-se a idéia utilizada por Givoni em seu estudo experimental: o espaço interno de uma sala é dividido em subdomínios onde a velocidade média do ar, sob diversas configurações de aberturas, é registrada. Como as velocidades médias refletem bem a eficácia da ventilação no subdomínio, elas formam a base para a definição espacial da função de pertinência para boa circulação de ar dentro da sala, considerando cada configuração de abertura. No entanto, ao invés de usar resultados experimentais, uma série de simulações computacionais baseadas em

CFD, foram executadas para compor um banco de dados para avaliação das funções de pertinência. Por outro lado, temos o leiaute, que é produzido durante a concepção do projeto. Na medida em que o leiaute provê as informações para elaborar os requisitos do fluxo de ar, a função de pertinência relacionada ao fluxo de ar em cada subdomínio deve ser avaliada baseada no leiaute e nos requisitos do usuário. Acertando os requisitos providos pelo leiaute com a eficácia do fluxo de ar provido pela configuração de abertura, pode ser identificada a configuração que melhor se adapta ao leiaute. Nos casos analisados neste trabalho, o método mostrou-se promissor, indicando a configuração típica que melhor atende aos requisitos de projeto com uma boa conformidade com os resultados obtidos pela simulação da sala completa, incluindo a mobília.

Palavras-chave: Ventilação natural. Habitação. Projeto. CFD. Qualidade do ar. Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

In the last years, due to the concerns on sustainability, a great effort in energy saving of building systems is being carried out worldwide. In tropical countries such as Brazil, the natural ventilation is an effective and economical option to improve thermal comfort inside the dwellings, to avoid the use of costly HVAC systems, and to renew the indoor air, contributing to mitigate the Sick Building Syndrome (SBS) and to improve the Indoor Air Quality (IAQ). In order to take advantage of the natural ventilation, the behaviors of the airflow inside the buildings must be analyzed considering the local climate. There are many computer simulation codes based on Computational Fluid Dynamics (CFD) that may be adopted for this purpose, however, CFD is a field that requires highly specialized knowledge and experience to achieve good results and this expertise, which is needed to obtain reliable numerical results, is generally beyond the formation of the most part of architects and engineers. Owing to these difficulties and on the necessity to form engineers and architects in this area of knowledge, this work is focused in two main objectives: The first one is to implement a numeric computational simulation program based on Solution Algorithm for Transient Fluid Flows (SOLA) and the boundary conditions needed to simulate ventilation. The validation of the code is made by comparing the numerical results with results obtained using numerical or experimental methods published by other authors. The second objective is to propose a practical tool for the analysis of natural ventilation in the design of dwellings, with an approach based on the concepts of the Fuzzy Systems Theory to identify the best configurations of the openings for a given layout. For this, the idea used by Givoni's experimental study is adopted: the inner space of a room is divided in sub-domains whose mean air velocities under different opening configurations are recorded. As the mean velocities reflect very well the effectiveness of the ventilation in the sub-domain, they form the basis for the definition of spatial distribution of the membership function for good air circulation inside the room concerning each opening configuration. However, instead of the experimental ones, a series of computer simulations were carried out to build a database for the assessment of the membership functions. On the other hand, we have the sketch of the layout, which is produced during the conceptual stage of design. As the layout provides the information about the requirements for the airflow,

the membership function regarding the desirable air flow for each sub-domain might be assessed based on the layout and considering the user's requirements. By matching the requirements provided by the layout with the effectiveness of the airflow provided by the opening configurations, the opening configuration that best fits the layout can be identified. In the cases analyzed in this work, the method shows promising results. The typical configuration that best fits the design requirements with a good conformity with the results was obtained by full room simulation, including the furniture.

Keywords: Natural ventilation. Dwelling. CFD. Indoor Air Quality. Fuzzy Logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Gráfico do consumo de energia, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), entre os anos de 1995 e 2005 (BRASIL, 2006)	2
Figura 1.2 - Previsão de ampliação da oferta de energia elétrica. Usinas em implantação (BRASIL, 2007)	2
Figura 1.3 – Previsão de ampliação da oferta de energia elétrica. Usinas em projeto (BRASIL, 2007).....	3
Figura 1.4 – (a) Variação das temperaturas médias nas regiões sudeste, centro-oeste e sul (b) Variação do consumo médio residencial nacional	5
Figura 3.1 – Fluxograma do método SOLA.....	22
Figura 3.2 – Posição de cálculo das variáveis.....	23
Figura 3.3 – Perfil de velocidade e modelo numérico para parede (a) com escorregamento livre e (b) sem escorregamento	27
Figura 3.4 – Desenho esquemático das fronteiras de entrada e saída	28
Figura 3.5 – (a) problema da aplicação da técnica de reflexão no canto (b) condição aplicada no simulador.....	30
Figura 3.6 – Condição de saída com antepara esbelta (esquerda) e com antepara espessa (direita)	31
Figura 3.7 – Influência da dimensão X da antepara no tempo de simulação	31
Figura 3.8 – Influência da espessura da parede na pressão.....	33
Figura 3.9 – Formação de vórtices atrás de um prisma quadrado	34
Figura 4.1 – Modelo de simulação do escoamento bidimensional em torno de um prisma.....	39
Figura 4.2 – Coeficientes de pressão na face de vento incidente	39
Figura 4.3 – Caso: cubo sobre uma superfície.....	41
Figura 4.4 – A influência da distância do limite do domínio de cálculo sobre o coeficiente de pressão nas faces laterais do cubo	41
Figura 4.5 – Comparação entre os perfis de velocidade utilizados na transição entre a condição inicial e o regime permanente	43
Figura 4.6 – Série temporal do número de iterações de cada ciclo para o perfil de velocidade linear (a) e senoidal (b).....	44

Figura 4.7 – Estruturas vorticais no escoamento ao redor de um cubo. Fonte: Sousa(2002)	44
Figura 4.8 – Comparação entre campos de velocidade obtidos pelo cálculo 2D com LES (Ayad, 1999) (a), cálculo 2D do programa implementado (b) e cálculo 3D do programa implementado (c)	46
Figura 4.9 – Coeficientes de pressão para os casos simulados.....	47
Figura 5.1 – Casos utilizados na simulação de ventilação dentro de salas.....	48
Figura 5.2 – Campos de velocidade obtidos pelos métodos LES (Ayad,1999) e versões 2D e 3D do programa implementado para o caso A, B e C.	49
Figura 5.3 – Configurações estudadas.....	52
Figura 5.4 – Velocidade média modular nos setores	53
Figura 5.5 – Modelos utilizados no estudo da ventilação cruzada	54
Figura 5.6 – Resultado da análise da velocidade média modular geral.	56
Figura 5.7 – Configuração 2D de aberturas e paredes utilizada como base para a análise dos efeitos 3D.....	57
Figura 5.8 – Modelo tridimensional simulado	57
Figura 5.9 – Modelo utilizado por Givoni (1962) em túnel de vento	58
Figura 5.10 – Velocidade média considerando toda seção da edificação (altura total).....	59
Figura 5.11 – Velocidade média considerando apenas a zona ocupada (até 1,8m) .	59
Figura 5.12– Velocidades observadas por Givoni	59
Figura 5.13 – Comparação das velocidade médias modulares entre os casos 2D e 3D.	60
Figura 6.1 – Processo de análise da ferramenta proposta	63
Figura 6.2 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando dois critérios diferentes para o índice de demanda	67
Figura 6.3 – (a) Pesos utilizados nos casos 1 e 2 e (b) Pesos utilizados no caso 3 .	72
Figura 6.4 – Resumo dos resultados fornecidos pelos métodos de seleção.....	80
Figura 6.5 – Demanda de máxima ventilação, resultado do “matching” = 0,65.....	81
Figura 6.6 – Demanda de ventilação por conforto, resultado do “matching” = 0,84 ..	82
Figura 6.7 – Demanda de ventilação por conforto requisitando menor ventilação sobre das camas resultado do “matching” = 0,80	82
Figura 6.8 – Demanda de ventilação por conforto requisitando maior ventilação sobre das camas resultado do “matching” = 0,79	82

Figura 6.9 – Leiaute e requisitos do dormitório	83
Figura 6.10 – Configurações típicas de aberturas consideradas na análise	84
Figura 6.11 – Velocidades médias modulares extraídas do banco de dados e os resultados do <i>matching</i>	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Influência da distância entre a janelas de saída do ar e a extremidade do domínio de simulação. Campo de velocidade no plano longitudinal ao escoamento	32
Tabela 4.1 – Taxas de bloqueio utilizadas na simulação	41
Tabela 5.1 – Resumo dos casos estudados	54
Tabela 5.2 – As razões entre a velocidade média modular e a velocidade de ar na entrada obtidas para os casos de ventilação cruzada sem desvio e com desvio	55
Tabela 6.1 – Configurações típicas de dormitórios	65
Tabela 6.2 – Requisitos para os casos estudados	71
Tabela 6.3 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 1)	73
Tabela 6.4 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 1)	75
Tabela 6.5 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 2)	76
Tabela 6.6 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 2)	77
Tabela 6.7 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 3)	78
Tabela 6.8 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 3)	79

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL	1
1.2 O CONSUMO ENERGÉTICO NAS RESIDÊNCIAS.....	4
1.3 SÍNDROME DO EDIFÍCIO DOENTE (SBS).....	5
1.4 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES	6
1.5 OBJETIVOS GERAIS.....	9
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 ESTUDOS SOBRE A VENTILAÇÃO NATURAL.....	12
2.2 NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VENTILAÇÃO.....	14
2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE A VENTILAÇÃO DE HABITAÇÕES	16
3 SIMULAÇÃO DA VENTILAÇÃO.....	20
3.1 FUNDAMENTOS DO FENÔMENO FÍSICO DA VENTILAÇÃO	20
3.2 MÉTODO SOLA	21
3.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO.	26
3.3.1 Paredes.....	26
3.3.2 Fronteira de entrada.....	28
3.3.3 Fronteira de saída	28
3.3.4 Fronteira periódica	29
3.3.5 Paredes internas e blocos.....	29
3.3.6 Janelas e portas.....	30
3.4 CONDIÇÕES INICIAIS.....	33
3.5 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA.....	33
4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO	38

4.1 ESCOAMENTO EXTERNO EM TORNO DE UM PRISMA DE COMPRIMENTO INFINITO	38
4.2 EFEITO DA PAREDE NO ESCOAMENTO	40
4.3 INFLUÊNCIA DO MODO DE ACELERAÇÃO	42
4.4 ESCOAMENTO EXTERNO EM TORNO DE UM CUBO.....	44
5 ANÁLISE DA VENTILAÇÃO POR MEIO DE SEÇÕES	48
5.1 ANÁLISE DA VENTILAÇÃO EM SALAS.....	48
5.2 ÍNDICES DE VENTILAÇÃO	49
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO.....	56
6 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO SIMPLIFICADO PARA A ANÁLISE DE VENTILAÇÃO.....	61
6.1 METODOLOGIA.....	61
6.2 ANÁLISE DAS PLANTAS ARQUITETÔNICAS.....	64
6.3 ÍNDICE DE DEMANDA DE VENTILAÇÃO	65
6.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	67
6.4.1 Soma dos Mínimos Quadrados.....	68
6.4.2 Índice de conformidade (IC)	68
6.4.3 Máxima Similaridade na estrutura generalizada de Łukasiewicz	69
6.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE SELEÇÃO.....	70
6.5.1 Análise da sensibilidade quanto aos requisitos	81
6.5.2 Exemplo de aplicação	83
7 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS.....	87
BIBLIOGRAFIA	93

1 INTRODUÇÃO

Em um país tropical como o Brasil, a ventilação natural é uma maneira eficaz e econômica de melhorar o conforto térmico dentro de habitações e, se bem estudada durante a fase de concepção da habitação, contribui minimizando a possibilidade de ocorrência da síndrome do edifício doente, aumentando a qualidade do ar interior além de evitar o uso de aparelhos de climatização, que são responsáveis por uma parcela do consumo energético residencial.

Neste capítulo será apresentado um panorama geral do consumo energético no país e nas residências, o conceito de edifício doente e o motivo de se utilizar a simulação computacional no estudo da ventilação. Por fim são apresentados os objetivos gerais, os objetivos específicos e o escopo do trabalho.

1.1 O CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL

A demanda energética no Brasil tem crescido nos últimos anos devido principalmente à estabilidade da economia, e agora houve um novo impulso no crescimento da demanda com o advento do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC). Na Figura 1.1 é apresentada a variação do consumo de eletricidade nos setores residencial, comercial e público entre os anos de 1995 e 2005. A unidade adotada no eixo vertical da figura é a tonelada equivalente de petróleo (tep), que equivale a quantidade de energia liberada pela queima de uma tonelada de petróleo bruto, e é a unidade para a qual são convertidas as unidades de medida das diferentes formas de energia utilizadas no Balanço Energético Nacional (BEN). Os fatores de conversão são calculados com base no poder calorífico inferior de cada energético em relação ao petróleo, de 10000 kcal/kg (BRASIL, 2006).

Figura 1.1 – Gráfico do consumo de energia, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), entre os anos de 1995 e 2005 (BRASIL, 2006)

Pela figura também se ressalta a queda no consumo em 2001 devido à crise energética seguido de um novo crescimento de demanda. É possível observar que o setor residencial foi de onde se conseguiu grande parte da redução de consumo que permitiu evitar o racionamento, isso sem ser necessária uma medida mais drástica, mostrando que muitos dos hábitos da população que geravam desperdícios foram mudados ajudando não apenas na redução como num consumo mais consciente.

Figura 1.2 - Previsão de ampliação da oferta de energia elétrica. Usinas em implantação (BRASIL, 2007)

Figura 1.3 – Previsão de ampliação da oferta de energia elétrica.
Usinas em projeto (BRASIL, 2007)

Hoje já foi superado o consumo da época da crise e isso foi possível devido a investimentos principalmente em usinas termoeletricas (UTE), usinas hidroelétricas (UHE) e pequenas centrais hidroelétricas (PCH), sendo prevista ainda a ampliação da oferta por meio da instalação de mais usinas como parte do PAC, como pode ser visto nas Figura 1.2 e Figura 1.3.

Neste contexto uma das formas de se ampliar a oferta de energia elétrica sem a necessidade de se construir novas usina é o investimento no aumento da eficiência energética. Um estudo do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) projeta que num cenário onde o Brasil melhorasse sua eficiência energética em 10% nos próximos 10 anos, economizaria o equivalente a 57.800 GWh em eletricidade por ano. O custo para atingir este nível de eficiência é estimado pelo BID é de US\$ 6,7 bilhões enquanto que o custo para se construir usinas e suprir essa demanda seria de US\$ 21,5 bilhões (BID, 2008).

1.2 O CONSUMO ENERGÉTICO NAS RESIDÊNCIAS

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2007 o crescimento do consumo de energia elétrica no país foi de 5,4%, sendo o maior desde o racionamento. No setor residencial, o aumento foi de 6,0% em relação a 2006 destacando a incorporação de mais de 1,8 milhões de novos usuários no setor residencial, bem como o aumento do consumo médio mensal por consumidor de 143 kWh em dezembro de 2006 para 147 kWh em novembro de 2007, valor que está bem abaixo dos 178 kWh de 2001 antes do racionamento (EPE, 2007, 2008a).

Com a crise enfrentada em 2001, houve uma mudança no processo de projeto passando a ser cada vez mais importante a redução do consumo energético durante a construção. Porém a eficiência energética no uso e manutenção da habitação, que tende a piorar com o envelhecimento da edificação, ainda é uma área com poucos estudos e que tem um impacto em longo prazo.

Segundo dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2002-2003 feita pelo IBGE (2006), considerando as famílias com renda de até 5 salários mínimos, quase 40% da renda é gasto com a habitação, sendo praticamente 3,5% da renda gasta com energia elétrica. Visto que com um projeto bem estudado de habitação, é possível que economia e conforto no uso sejam atingidos, para estas famílias, um projeto de habitação de interesse social que permita a redução destes gastos, atenuará de forma permanente a economia doméstica.

A influência do uso de aparelhos de refrigeração e climatização no consumo de energia elétrica pode ser observada no primeiro trimestre de 2008, período onde as regiões sul, sudeste e centro-oeste do país tiveram um verão mais ameno do que no mesmo período de 2006 e 2007, conforme ilustrado na Figura 1.4. Com isso verifica-se o impacto de sua utilização no consumo das residências e a importância de melhorar a eficiência energética das edificações, principalmente se considerarmos que as regiões atingidas por este verão mais ameno correspondem a 77% do consumo total brasileiro (EPE, 2008b).

Figura 1.4 – (a) Variação das temperaturas médias nas regiões sudeste, centro-oeste e sul
(b) Variação do consumo médio residencial nacional

1.3 SÍNDROME DO EDIFÍCIO DOENTE (SBS)

A preocupação com redução do consumo energético nas edificações iniciou-se com o aumento do uso dos ambientes climatizados artificialmente. Para a redução do consumo nestes ambientes criou-se a concepção de edifícios vedados, onde a troca de ar com o ambiente externo é minimizada ao máximo para evitar os gastos com o resfriamento de ar exterior. Esta abordagem trouxe efeitos colaterais na qualidade do ar que vieram a ser estudados mais tarde, ganhando importância cada vez maior dada a quantidade de edificações que fazem uso deste tipo de ambiente.

Com estes estudos ficou claro que os poluentes mais comuns encontrados no exterior não exercem sozinhos seus efeitos danosos dentro da edificação, surgindo então uma nova gama de poluentes a serem estudados, poluentes estes que somente conseguem atingir concentrações significativas em ambientes fechados, lançando um novo desafio na identificação e quantificação destes poluentes além dos danos que podem causar à saúde.

A existência da SBS foi mundialmente reconhecida em 1982, pela Organização Mundial da Saúde (OMS), quando foi comprovada a conexão da contaminação do ar interno com 182 casos de pneumonia e morte de 29 pessoas em um hotel na Filadélfia (INMETRO, 2002).

A portaria nº 3.523 do Ministério da Saúde em seu art. 4 item i define:

“Síndrome dos Edifícios Doentes: consiste no surgimento de sintomas que são comuns a população em geral, mas que, numa situação temporal, pode ser relacionado a um edifício em particular. Um incremento substancial na prevalência dos níveis dos sintomas, antes relacionados, proporciona a relação entre o edifício e seus ocupantes.” (BRASIL,1998)

Segundo a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency – EPA*) dos Estados Unidos:

“The term "sick building syndrome" (SBS) is used to describe situations in which building occupants experience acute health and comfort effects that appear to be linked to time spent in a building, but no specific illness or cause can be identified. The complaints may be localized in a particular room or zone, or may be widespread throughout the building.” (Estados Unidos, 1991)

Ou seja, a SBS consiste no surgimento de sintomas comuns à população, entre eles irritação dos olhos, nariz, pele e garganta, dores de cabeça, fadiga, falta de concentração e náuseas, de modo que podem ser relacionados com a ocupação de determinado edifício e em alguns casos a saída do usuário afetado pela síndrome para o exterior do edifício já é suficiente para reduzir significativamente ou fazer os sintomas desaparecerem.

Dentre outros fatores associados à SBS estão a alta taxa de absenteísmo, redução na produtividade e qualidade de vida dos ocupantes do edifício devido a exposição a um ambiente inadequado à ocupação.

1.4 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES

Do ponto de vista da eficiência energética é altamente recomendável o uso da ventilação natural, enquanto esta é um meio eficiente de proporcionar conforto térmico. Isso porque o peso dos sistemas de condicionamento de ar no consumo de energia é muito grande, e conforme a classificação proposta na “Regulamentação para etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos” o peso do sistema de condicionamento de ar é de 40% frente a 30% dos sistemas de iluminação e da envoltória do edifício (ELETROBRÁS, 2007).

Além dos aspectos de conforto térmico existem as preocupações com a qualidade do ar interno, conforto térmico e a SBS, que estão diretamente ligadas à ventilação das edificações. Muitas das normas de ventilação, chamadas de prescritivas, utilizam como referência para considerar uma edificação bem ventilada o número de trocas de ar por hora e a área de aberturas para a ventilação natural (MACDONALD; REARDON, 2007). Porém com a evolução e aumento da complexidade dos sistemas de ventilação e ar condicionado, outra vertente de norma baseada no desempenho do sistema na remoção de contaminantes se torna mais adequada para a avaliação da qualidade do ar interno, este tipo de norma exige que se demonstre que o sistema de ventilação projetado fornece ar suficiente para manter o ambiente interno dentro das condições regulamentadas de qualidade do ar e concentração de poluentes.

Para o projeto de edificações energeticamente eficientes, se faz necessário o uso de técnicas de avaliação do projeto antes de sua execução. Para efetuar esta avaliação existem três tipos de abordagem possíveis:

1. Experimental: utilizando modelos reduzidos das edificações, em túneis de vento simulando as condições do local da construção. Apesar da precisão razoável obtida por esta abordagem, o custo de se fazer um novo modelo ou protótipo para cada alteração no projeto pode ser excessivo frente ao custo do empreendimento.
2. Analítico: o cálculo baseado em hipóteses simplificadoras e com resultados pouco precisos, embora seja importante para se ter um entendimento geral do fenômeno, não são suficientes para realizar uma análise quantitativa principalmente nos casos mais complexos.
3. Numérico computacional: mais econômico que o método experimental e com resultados mais precisos que o método analítico, fornece um bom equilíbrio entre custo e precisão se mostrando adequado para o estudo da ventilação em edificações.

A análise da ventilação pelo método numérico-computacional é feita principalmente por meio de programas de CFD, apesar de serem abordagens bem difundidas em

outras áreas da engenharia, na engenharia civil são utilizados principalmente no cálculo de esforços causados pelo vento em sistemas estruturais.

Segundo Yamamoto (2005) atualmente mesmo com programas de simulação disponíveis, diversos parâmetros e desempenho das edificações ainda são avaliados apenas após a ocupação da construção. Como a detecção tardia dos problemas acarreta no aumento do custo para solucioná-los, a análise por meio da simulação computacional, ainda na fase de projeto, pode ajudar a evitar as falhas e trazer um significativo ganho na qualidade do projeto.

Atualmente, grande parte dos programas computacionais existentes baseados em CFD é voltada para a análise de escoamentos dos tipos encontrados na indústria aeronáutica, automobilística e química. Os programas possíveis de serem utilizados para a análise de edificações são voltados para a ventilação mecânica, onde as condições de contorno são mais bem definidas que na ventilação natural.

O escopo deste trabalho situa-se na adaptação do método de simulação baseado em CFD proposto por Hirt, Nichols e Romero (1975), *Solution Algorithm for Transient Fluid Flows* (SOLA), para o estudo da ventilação natural.

Foram simulados casos de ventilação cruzada em configurações típicas de salas e os resultados foram comparados com os dados publicados. Com base nos resultados obtidos é proposto um método prático para a análise de ventilação utilizando um banco de dados dos padrões típicos de ventilação, que são confrontados com o leiaute da sala em projeto de modo a otimizar a configuração das aberturas.

Uma das grandes dificuldades em utilizar o CFD para simulação se deve aos parâmetros utilizados, principalmente aqueles específicos da simulação como o *time-step*, limite de convergência e definição do espaçamento da malha necessitam de certo grau de conhecimento do método utilizado na simulação.

Além disso, o uso de CFD necessita de conhecimentos altamente especializados, para que se atinjam bons resultados. Por exemplo, para um mesmo caso, o uso de parâmetros de simulação distintos pode fornecer resultados diferentes. Este tipo de conhecimento geralmente está além da formação da maior parte dos arquitetos,

resultando na necessidade de desenvolver um método para fornecer dados ao CFD de modo a obter bons resultados das simulações.

Para contornar estas dificuldades no uso do CFD, neste trabalho é proposta uma metodologia baseada na lógica nebulosa que permite que o projetista utilize indiretamente o simulador por meio dos resultados das simulações em CFD armazenadas em um banco de casos.

Com o conhecimento apenas do leiaute da habitação, dos ventos no local da edificação e dos critérios de conforto que serão utilizados, sem a necessidade do conhecimento prévio de toda teoria que embasa a dinâmica dos fluidos, a metodologia procura vincular os requisitos do projetista com um dos casos já simulados, fornecendo a melhor configuração de aberturas para um dado leiaute de móveis ou, em outro uso possível, a melhor configuração de móveis para dado leiaute.

1.5 OBJETIVOS GERAIS

Em função da importância da ventilação natural no desempenho das edificações e a necessidade do estudo do fenômeno nas fases iniciais do projeto, o objetivo deste trabalho é contribuir para o estudo sobre a simulação computacional da ventilação natural e facilitar a aplicação da técnica no projeto. Por ser um fenômeno extremamente complexo que envolve diversos fatores internos e externos, simplificou-se o estudo considerando as condições de escoamento de ar bem definidas.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dadas estas especificidades e escassez de programas voltados para o tema principal do trabalho e visando a capacitação e difusão tecnológica, foram escolhidos os seguintes objetivos específicos do trabalho.

Implementação e validação de um programa de simulação numérico-computacional da ventilação natural em habitações implementando o método SOLA para fluidos incompressíveis, e sua adaptação para escoamentos 3D e condições de contorno comumente encontrados nas edificações.

Desenvolvimento de um método baseado nos conceitos da lógica nebulosa, utilizando o conceito de velocidade média modular em seções, adaptado de Givoni (1962), e configurações básicas de leiaute de modo a servir como um primeiro estudo da ventilação na fase de projeto.

Este método poderá servir também para inserir aos poucos o uso do CFD no estudo do projeto do leiaute da edificação.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Foi apresentada no capítulo 1 uma breve descrição do panorama energético brasileiro e da ventilação nas residências.

No capítulo 2 são apresentadas algumas definições sobre a síndrome do edifício doente e uma revisão sobre a legislação brasileira sobre a ventilação em ambientes internos. Apresentamos também alguns artigos sobre ventilação natural conduzida por outros pesquisadores e a contribuição de cada um para o estudo da ventilação.

Apresenta-se no capítulo 3 o método de simulação, primeiro mostrando os fundamentos da ventilação, equações governantes e principais hipóteses. Em seguida são apresentados os conceitos do método SOLA, as condições iniciais e de contorno para a simulação das edificações. No final do capítulo é apresentada uma introdução a modelagem da turbulência e apresenta-se o modelo adotado no simulador.

No capítulo 4 são apresentados os casos de validação do programa de simulação e das condições de contorno utilizadas.

No capítulo 5 é apresentada uma aplicação prática do simulador no estudo da ventilação, cujos resultados são sintetizados na forma de uma distribuição de índices de ventilação.

O capítulo 6 propõe um método prático de auxílio ao projeto, que realiza a análise da ventilação com base num banco de dados dos resultados obtidos das simulações efetuadas com algumas configurações comuns de aberturas.

Finalmente no capítulo 7 resumem-se as conclusões obtidas no trabalho bem como uma análise crítica dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns estudos sobre a ventilação natural, conduzida por outros pesquisadores e a contribuição de cada um para o estudo do fenômeno da ventilação.

Também são apresentadas algumas definições sobre a síndrome do edifício doente além de uma revisão da legislação brasileira sobre a ventilação em ambientes internos.

2.1 ESTUDOS SOBRE A VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural, apesar de ser uma das formas mais antigas de ventilação conhecida e ser o método mais empregado em diversos projetos, tem poucos estudos em desenvolvimento quando comparado com a ventilação mecânica e sistemas de ar condicionado. Alguns destes estudos que tiveram contribuição no estudo da ventilação natural são apresentados a seguir.

Givoni (1962) apresentou em sua tese um estudo sobre os efeitos da velocidade do ar no exterior de uma edificação na velocidade média do ar interior desta, utilizando para isso experimentos em um túnel de vento com um modelo reduzido de uma sala, com aberturas em paredes opostas simulando a ventilação cruzada. Por meio dos resultados medidos, ele conclui que para as condições do experimento, velocidade média interna é aproximadamente 16% da velocidade do ar externo, com uma distribuição de velocidade interna similar para as diversas velocidades externas experimentadas.

Castro e Robins (1977) divulgam os resultados de seus experimentos sobre o fluxo de ar ao redor de um cubo, feito em um túnel de vento. Estes resultados, um dos primeiros a avaliar as três dimensões do fenômeno, serviram para impulsionar o desenvolvimento de métodos numéricos e muitos autores como Thomas e Williams (1999), Sousa (2002) e Alfonsi; Restano e Primavera (2003) o utilizam como uma

referência para a validação e verificação. Para a ventilação este experimento engloba diversas aplicações como o fluxo ao redor de obstáculos dentro do ambiente ou ainda a distribuição de pressões ao redor de edifícios de forma simples.

Chen e Xu (1998) analisaram e desenvolveram um modelo algébrico de turbulência voltado para ventilação interna de salas e com este método conseguiram chegar a bons resultados, utilizando muito menos recursos e pelo menos 10 vezes mais rápido que o consagrado método de duas equações $k - \varepsilon$.

Ayad (1999) estudou as propriedades da ventilação de uma sala utilizando diferentes configurações de abertura por meio de CFD e *Large Eddy Simulation* (LES) como modelo de turbulência, mostrando que apesar da eficácia da ventilação cruzada na região próxima do fluxo de ar, os baixos níveis de turbulência simulados não são suficientes para auxiliar na ventilação das zonas de estagnação e não alteram significativamente o fluxo de ar dentro do ambiente. No entanto ressalta que a turbulência não deve ser subestimada já que o fluxo no exterior da edificação é sensível a esta variável, podendo alterar significativamente o fluxo nas aberturas.

Jiang et al. (2003) utilizaram simulações computacionais e LES como modelo de turbulência, simularam casos de ventilação simples e cruzada em salas, apresentando resultados de pressão e velocidade no entorno do modelo.

Evola e Popov (2006) fizeram uma análise da ventilação natural por meio de um código CFD acoplado a um modelo de turbulência do tipo $k - \varepsilon$ renormalizado, publicando resultados de velocidade ao redor do modelo e pressão média nas faces.

Observa-se que houve um grande vazio de publicações voltadas para a ventilação natural, desde Givoni em 1962 até a década de 90 quando o aumento dos custos com energia e a preocupação com problemas causados pelo consumo não sustentável de energia impulsionaram as pesquisas em eficiência energética.

Durante este período grande parte dos artigos publicados é referente à redução dos custos energéticos com ventilação mecânica e condicionamento de ar, cujos esforços serviram para construir a base de conhecimento que temos hoje para o estudo da ventilação.

Porém este legado vindo da ventilação mecânica e sistemas de condicionamento de ar, que por sua vez adaptaram sua tecnologia a partir dos sistemas de simulação aeronáuticos e automobilísticos, trazem consigo a necessidade dos atuais engenheiros civis e arquitetos, que irão trabalhar com a simulação da ventilação, adquirir novos conhecimentos advindos de outras áreas da engenharia e de computação.

Muitos engenheiros civis e arquitetos quando confrontados com o problema de programar uma máquina complexa como o computador, ou ainda utilizar um *software* que necessita de muitos dados acabam por abandonar esta alternativa, seja devido ao pragmatismo imposto pelo setor da construção, ou pelo perfil de alguns profissionais que podem estar trazendo desde a graduação uma aversão ao uso de ferramentas computacionais mais complexas e de programação.

Faz se necessário então o uso de métodos para simplificar a utilização dos programas de simulação de modo que em um primeiro momento, facilite a integração entre usuários e sistema e permita obter uma estimativa razoavelmente precisa, e a partir daí realizar um estudo mais detalhado utilizando os programas de simulação com todo seu poder.

2.2 NORMAS INTERNACIONAIS SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VENTILAÇÃO

O projeto de edificações energeticamente eficientes que proporcionem conforto e qualidade no seu uso já possui normas internacionais que podem ser utilizadas como referência para se basear e avaliar a eficiência. Dentre estas normas, quanto à eficiência energética podem ser citadas:

- ASHRAE 90.1-2004 “*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*” para grandes edifícios residenciais que se encontra em processo de revisão (ASHRAE, 2004b).

- ASHRAE 90.2-2007 “*Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings*” para residências unifamiliares e pequenas edificações residenciais de até 3 pavimentos (ASHRAE, 2007a).

No aspecto do conforto térmico:

- ASHRAE 55-2004 “*Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy*” (ASHRAE, 2004a).
- ISO-7730:1984 “*Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*” que utiliza o método amplamente difundido desenvolvido por Fanger (1972) (ISO, 1984).

A maioria das normas de ventilação considera que para a ventilação natural, o fluxo de ar proveniente da infiltração pelas portas e janelas é suficiente para fornecer o mínimo de renovação de ar necessária para um ambiente interno. Porém sabe-se que a quantidade de ar necessária para a ventilação de um ambiente varia conforme a quantidade de pessoas e ambientes cuja ventilação depende dos ambientes com aberturas voltadas para o exterior.

Uma das primeiras formas de se considerar estes aspectos na ventilação é através da determinação das aberturas mínimas que deveriam atender os requisitos de qualidade do ar internos. As normas que utilizam este tipo de abordagem são denominadas normas prescritivas.

Atualmente as normas têm migrado para uma abordagem mais física do problema, onde se estabelece apenas os critérios mínimos de qualidade do ar a ser alcançada pelas edificações sendo necessária a comprovação destes requisitos seja por formulações empíricas reconhecidas ou por meio de simulações computacionais. As normas que se baseiam nesta metodologia de trabalho são designadas normas de desempenho.

Neste contexto da qualidade do ar, tem-se o conjunto de normas ASHRAE 62 que vem sendo desenvolvido desde 1973 com constante acompanhamento e

atualização para os novos sistemas de ventilação e requisitos de qualidade do ar, o qual é composto pelas normas:

- ASHRAE 62.1-2007 “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” dispõe sobre taxas mínimas de ventilação e qualidade do ar para mitigar os efeitos nocivos aos habitantes (ASHRAE, 2007b)
- ASHRAE 62.2-2007 “Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings” que define diretrizes e requisitos mínimos para sistemas de ventilação mecânica e natural e para a envoltória da edificação com o objetivo de prover qualidade de ar interior aceitável em edificações de pequeno porte (ASHRAE, 2007c).

Este conjunto de normas aceita as duas metodologias, prescritiva e de desempenho, uma vez que são feitas para edificações residenciais e muitas vezes o uso da metodologia de desempenho não se justifica para pequenas habitações.

2.3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE A VENTILAÇÃO DE HABITAÇÕES

Durante a 2ª conferência HABITAT em Istambul, os países membros da Nações Unidas definiram habitação como:

“Adequate shelter means more than a roof over one's head. It also means adequate privacy; adequate space; physical accessibility; adequate security; security of tenure; structural stability and durability; adequate lighting, heating and ventilation; adequate basic infrastructure, such as water-supply, sanitation and waste-management facilities; suitable environmental quality and health-related factors; and adequate and accessible location with regard to work and basic facilities: all of which should be available at an affordable cost. Adequacy should be determined together with the people concerned, bearing in mind the prospect for gradual development. Adequacy often varies from country to country, since it depends on specific cultural, social, environmental and economic factors. Gender-specific and age-specific factors, such as the exposure of children and women to toxic substances, should be considered in this context.” (UN-HABITAT,1996; BONNEFOY, 2007)

No Brasil a Lei nº 10.295, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, instituindo os níveis máximos de consumo, ou a eficiência energética mínima para equipamentos elétricos, conhecida também como “Lei de

Eficiência Energética”, em seu artigo 4º encarrega o poder executivo de promover a eficiência energética nas edificações construídas no país (BRASIL, 2001).

Em 2003, O governo brasileiro lançou o programa de consumo racional de energia elétrica - PROCEL, por meio da etiquetagem de equipamentos elétricos conforme sua eficiência energética. Seguindo no mesmo sentido do PROCEL, foi lançado o programa de etiquetagem voluntária de edifícios públicos, que engloba três requisitos principais: eficiência e potência do sistema de iluminação, eficiência do sistema de condicionamento de ar e desempenho térmico da envoltória do edifício. A regulamentação para edificações residenciais, devido à grande variedade e extensão dos fatores a serem considerados está em fase de avaliação quanto a qual segmentação será mais adequada (ELETROBRÁS, 2008).

No Brasil as legislações para qualidade do ar interior, apenas para ambientes artificialmente climatizados, começaram a ganhar força somente em 1998 após a morte do ex-ministro das comunicações Sérgio Motta, decorrente do agravamento do seu estado de saúde devido ao acúmulo de fungos nos dutos de ar condicionado, ou seja, este fato é relacionado a um estado avançado da síndrome do edifício doente.

A partir desse fato foram publicadas a portaria nº 3.523/GM de 28 de agosto e 1998 do Ministério da Saúde para “garantir a qualidade do ar de interiores e prevenção de riscos à saúde dos ocupantes de ambientes climatizados” (BRASIL, 1998), a resolução RE nº 176 (BRASIL, 2000) que foi atualizada pela resolução RE nº 9 (BRASIL, 2003) “Padrões referenciais de qualidade do ar interior em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo”.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa não foi encontrada legislação federal que regulamente condições mínimas de qualidade do ar e ventilação de habitações, sendo então, de acordo com o código civil, facultado aos estados e municípios legislar sobre o tema. Geralmente o código de obras do município regulamenta aberturas mínimas a serem deixadas para ventilação e iluminação. Cita-se como exemplo o código de obras e edificações do município de São Paulo (SÃO PAULO, 1992) que regulamenta algumas dimensões mínimas, a área das aberturas para iluminação e ventilação são calculadas com base na área de piso de cada ambiente,

além de regulamentar recuos e vãos de modo a permitir que as aberturas efetivamente funcionem para a ventilação do ambiente, como pode ser visto no trecho abaixo.

“(…)

11.2.2 - As aberturas para aeração e insolação dos compartimentos poderão estar ou não em plano vertical e deverão, observado o mínimo de 0,60 m² (sessenta decímetros quadrados) ter dimensões proporcionais à área do compartimento de, no mínimo:

a) 15% (quinze por cento) para insolação de compartimentos dos "GRUPOS A e B";

b) 10% (dez por cento) para insolação de compartimentos do "GRUPO C".

11.2.2.1 - Metade da área necessária à insolação deverá ser destinada à aeração do compartimento.

11.2.2.2 - Quando a aeração e insolação de um compartimento forem feitas através de outro, o dimensionamento da abertura voltada para o exterior será proporcional à somatória das áreas dos dois compartimentos.”

Sendo os grupos definidos conforme abaixo:

“11.1.1 - Classificar-se-ão no "GRUPO A" aqueles destinados a:

a) repouso, em edificações destinadas a atividades habitacional ou de prestação de serviços de saúde e de educação;

b) estar, em edificações destinadas a atividade habitacional;

c) estudo, em edificações destinadas a atividades habitacional ou de prestação de serviços de educação em estabelecimentos de ensino até o nível de segundo grau.

(…)

11.1.2 - Classificar-se-ão no "GRUPO B" aqueles destinados a:

a) repouso, em edificações destinadas a prestação de serviços de hospedagem;

b) estudo, em edificações destinadas a prestação de serviços de educação, salvo os estabelecimentos de ensino até o nível de segundo grau;

c) trabalho, reunião, espera e prática de exercício físico ou esporte, em edificações em geral.

(…)

11.1.3 - Classificar-se-ão no "GRUPO C" aqueles destinados a:

a) depósitos em geral, com área superior a 2,50 m² (dois metros e cinquenta decímetros quadrados);

b) cozinhas, copas e lavanderias.”

O Comitê Brasileiro de Construção Civil (COBRACON ou CB02) desenvolveu uma norma voltada para o Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos a NBR 15.575, que foi publicada em 12 de Maio de 2008 e válida a partir de 12 de Maio de 2010. A parte 1 desta norma traz requisitos para saúde, higiene e qualidade do ar (ABNT, 2007a) e na parte 4 “Sistemas de vedações verticais externas e internas” traz o dimensionamento mínimo para a ventilação de ambientes de longa permanência como sala, cozinha e dormitório (ABNT, 2007b).

“Normas de desempenho são estabelecidas buscando atender exigências dos usuários que, no caso desta Norma, referem-se a sistemas que compõem edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, independentemente dos seus materiais constituintes e do sistema construtivo utilizado.” (ABNT, 2007a)

Com isto em vista, a NBR 15.575 tenta regulamentar de forma geral a qualidade do ar dentro da edificação e condições físicas mínimas para se conseguir o conforto térmico, sendo a primeira norma brasileira a estabelecer este tipo diretriz para habitações.

3 SIMULAÇÃO DA VENTILAÇÃO

Este capítulo é focado no método de simulação, apresentando primeiro os fundamentos da ventilação, as equações governantes e principais hipóteses. Em seguida são apresentados os conceitos do método SOLA, as condições iniciais e suas principais condições de contorno para a simulação de edificações. No final do capítulo é feita uma introdução à modelagem de turbulência e apresenta-se o modelo adotado no simulador.

3.1 FUNDAMENTOS DO FENÔMENO FÍSICO DA VENTILAÇÃO

A ventilação é definida como sendo o processo de suprir e remover ar por meios naturais ou mecânicos para um espaço qualquer, podendo este ar ser ou não condicionado. Assim como o fluxo de outros gases e líquidos, ela é regida pelas equações governantes do escoamento de fluidos, que são uma representação matemática das leis de conservação da física:

- Conservação de massa: onde a quantidade de massa que entra em um determinado volume de controle deve ser igual a que sai.
- Conservação de momento: expressa a segunda lei de Newton onde a taxa de mudança do momento é equivalente à soma das forças externas aplicadas em uma partícula do fluido.

Considerando o fluxo do ar na ventilação como um escoamento incompressível, as equações de conservação de massa, eq. (1), e de momento, eq. (2), podem ser escritas conforme a formulação a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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

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 $\rho_{ar} = 1,2 \text{ Kg/m}^3$)

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 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]

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

3.2 MÉTODO SOLA

Para as simulações feitas neste trabalho foi utilizado o método SOLA para escoamentos incompressíveis proposto por Hirt; Nichols e Romero (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, eq. (2), 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, eq. (1), 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 na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma do método SOLA

Para a solução das equações de conservação de momento e de massa em um sistema computacional foi utilizado o método de diferenças finitas aplicado a uma malha com espaçamento constante nas direções Δx , Δy e Δz , horizontal, profundidade e vertical respectivamente.

No esquema de discretização utilizado neste método as componentes do vetor de velocidade são calculadas no centro da face do elemento, enquanto que as grandezas escalares como a pressão são calculadas no centro do elemento, como demonstrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Posição de cálculo das variáveis

Nas equações (3) a (8) o sobrescrito n é usado para indicar o instante de tempo $t = n \times \Delta t$, onde Δt é o *time-step* (o acréscimo de tempo), na qual as variáveis são calculadas.

Utilizando diferenças centrais, a equação da continuidade se torna:

$$\frac{(u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i-1,j,k}^{n+1})}{\Delta x} + \frac{(v_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j-1,k}^{n+1})}{\Delta y} + \frac{(w_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k-1}^{n+1})}{\Delta z} = 0 \quad (3)$$

Na equação de momento, é utilizada a técnica *upstream difference* de segunda ordem no cálculo dos termos convectivos, sendo assim para a velocidade tem-se:

$$\begin{aligned}
 u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^n + \Delta t \left\{ \frac{1}{\rho \Delta x} (P_{i,j,k}^n - P_{i+1,j,k}^n) + g_x + \frac{f_x^n}{\rho} - FUX - FUY - FUZ + VISCX \right\} \\
 v_{i,j,k}^{n+1} &= v_{i,j,k}^n + \Delta t \left\{ \frac{1}{\rho \Delta y} (P_{i,j,k}^n - P_{i,j,k+1}^n) + g_y + \frac{f_y^n}{\rho} - FVX - FVY - FVZ + VISCY \right\} \\
 w_{i,j,k}^{n+1} &= w_{i,j,k}^n + \Delta t \left\{ \frac{1}{\rho \Delta z} (P_{i,j,k}^n - P_{i,j,k+1}^n) + g_z + \frac{f_z^n}{\rho} - FWX - FWY - FWZ + VISCZ \right\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

$$FUX = \left[\frac{\partial u^2}{\partial x} \right]_{i,j,k}^n = \frac{1}{4\delta x} \left[(u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k})^2 + \alpha |u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}| \cdot (u_{i,j,k} - u_{i+1,j,k}) - (u_{i-1,j,k} + u_{i,j,k})^2 - \alpha |u_{i-1,j,k} + u_{i,j,k}| \cdot (u_{i-1,j,k} - u_{i,j,k}) \right] \quad (5)$$

$$FUY = \left[\frac{\partial uv}{\partial y} \right]_{i,j,k}^n = \frac{1}{4\delta y} \left[(v_{i,j,k} + v_{i+1,j,k})(u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}) + \alpha |v_{i,j,k} + v_{i+1,j,k}| \cdot (u_{i,j,k} - u_{i+1,j,k}) - (v_{i,j-1,k} + v_{i+1,j-1,k})(u_{i,j-1,k} + u_{i,j,k}) - \alpha |v_{i,j-1,k} + v_{i+1,j-1,k}| \cdot (u_{i,j-1,k} - u_{i,j,k}) \right] \quad (6)$$

$$FUZ = \left[\frac{\partial uw}{\partial z} \right]_{i,j,k}^n = \frac{1}{4\delta z} \left[(w_{i,j,k} + w_{i+1,j,k})(u_{i,j,k} + u_{i+1,j,k}) + \alpha |w_{i,j,k} + w_{i+1,j,k}| \cdot (u_{i,j,k} - u_{i+1,j,k}) - (w_{i,j,k-1} + w_{i+1,j,k-1})(u_{i,j,k-1} + u_{i,j,k}) - \alpha |w_{i,j,k-1} + w_{i+1,j,k-1}| \cdot (u_{i,j,k-1} - u_{i,j,k}) \right] \quad (7)$$

$$VISCX = \nu [\nabla^2 u]_{i,j,k}^n = \nu \left[\frac{u_{i+1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k}}{\delta x^2} + \frac{v_{i,j+1,k} - 2v_{i,j,k} + v_{i,j-1,k}}{\delta y^2} + \frac{w_{i,j,k+1} - 2w_{i,j,k} + w_{i,j,k-1}}{\delta z^2} \right] \quad (8)$$

Para as velocidades FVX , FVY , FVZ , FWX , FWY , FWZ e viscosidades $VISCY$ e $VISCZ$ formulações equivalentes podem ser deduzidas de forma semelhante.

As equações (4) discretizadas para u , v e w são utilizadas na primeira etapa do método SOLA onde é feita a estimativa do campo de velocidades.

Passa-se então para a etapa de cálculo iterativo do ajuste de pressão e velocidade onde para cada célula é calculado o divergente D dado pela eq. (9).

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9)$$

Observa-se que o divergente é semelhante à equação de conservação de massa, eq. (3). A variação de pressão necessária para reduzir o divergente à zero é dada pela eq. (10).

$$\Delta P = - \frac{\omega D}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} \quad (10)$$

onde:

ΔP é a variação de pressão [Pa],

ω é o fator de sobre-relaxação, tipicamente utilizado 1,8,

Δt é o *time-step* [s]

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ são os espaçamentos da malha em x, y e z respectivamente [m].

Sendo que a pressão atualizada na célula é dada pela soma desta variação à pressão estimada, ou seja $P_{i,j,k}^* = P_{i,j,k} + \Delta P$. O ajuste das velocidades é dado pelas equações abaixo.

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^* &= u_{i,j,k} + \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta x} \\ u_{i-1,j,k}^* &= u_{i-1,j,k} - \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta x} \\ v_{i,j,k}^* &= v_{i,j,k} - \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta y} \\ v_{i,j-1,k}^* &= v_{i,j-1,k} - \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta y} \\ w_{i,j,k}^* &= w_{i,j,k} - \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta z} \\ w_{i,j,k-1}^* &= w_{i,j,k-1} - \frac{\Delta t \Delta P}{\Delta z} \end{aligned}$$

A convergência do processo iterativo é dada quando o divergente D se torna menor que um dado valor limite ε tipicamente da ordem de 10^{-3} ou menor.

3.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO

Devido ao esquema de discretização adotado, é necessário o uso de uma camada extra de células, chamadas de “*dummy cells*”, nas bordas do domínio de simulação para o cálculo das derivadas. Esta camada extra também auxilia na aplicação das condições de contorno.

As principais condições de contorno utilizadas na simulação são as paredes com escorregamento livre para a simulação de fluidos invíscidos e sem escorregamento para a simulação de fluidos viscosos, entrada de fluxo, saída de fluxo e condição de contorno periódica

3.3.1 Paredes

As paredes rígidas são modeladas igualando-se a zero a componente da velocidade normal à ela. Nas componentes tangenciais, é aplicada a técnica de reflexão, ilustrada na Figura 3.3, para simular os efeitos da viscosidade ou da ausência dela.

Figura 3.3 – Perfil de velocidade e modelo numérico para parede
(a) com escorregamento livre e (b) sem escorregamento

Na técnica de reflexão a componente tangencial da velocidade no *dummy cell*, em vermelho, serve como condição auxiliar no cálculo. Esta velocidade é imposta conforme o tipo de parede que se deseja simular.

Igualando-se a velocidade tangencial do *dummy cell* à velocidade tangencial da célula vizinha dentro do escoamento obtém-se a condição de parede com escorregamento livre e gradiente de velocidade tangencial na direção normal à parede igual a zero, ou seja, $\partial u / \partial z = \partial v / \partial z = 0$ no caso das superfícies paralelas ao plano XY, $\partial v / \partial x = \partial w / \partial x = 0$ para as paralelas ao plano YZ e $\partial u / \partial y = \partial w / \partial y = 0$ às paralelas ao plano XZ. Esta condição corresponde à condição de contorno de parede para escoamento invíscido, Figura 3.3 (a).

Fazendo com que a velocidade tangencial do *dummy cell* seja oposta a do escoamento, obtém-se a condição de parede sem escorregamento, utilizado em escoamentos viscosos onde a velocidade tangencial na parede é igual a zero, mantendo um gradiente de velocidade tangencial na direção normal da parede, Figura 3.3 (b).

3.3.2 Fronteira de entrada

Na fronteira de entrada os valores das componentes da velocidade são impostos ao longo desta como dados de entrada, conforme mostram as setas vermelhas na Figura 3.4. Uma equação de aceleração do fluxo é utilizada de modo a criar uma rampa de aceleração para sair da condição inicial em repouso até atingir o regime permanente, esta equação será melhor discutida no item 4.3.

Figura 3.4 – Desenho esquemático das fronteiras de entrada e saída

3.3.3 Fronteira de saída

Na fronteira de saída do fluído, Figura 3.4, é imposta a condição de continuidade, que corresponde a não variação do escoamento. Em outras palavras para uma fronteira paralela ao plano YZ deve-se ter $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$ e $\frac{\partial w}{\partial x} = 0$ para as velocidades e $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ para a pressão. Esse tipo de imposição se deve ao

desconhecimento do comportamento do fluido após a fronteira de saída. Sendo assim, a fronteira deve ser posicionada suficientemente longe do objeto em estudo de tal modo que eventuais perturbações geradas pelas condições de contorno não afetem o fluxo principal.

Esta condição por ser muito limitante, ela é aplicada apenas uma vez no começo de cada *time-step*.

3.3.4 Fronteira periódica

No caso da fronteira periódica, as componentes de velocidade e pressão de uma extremidade do domínio de cálculo são aplicadas diretamente na extremidade oposta, de modo que o fenômeno se repita numa extensão correspondente a distância entre as duas extremidades do domínio de cálculo. Este tipo de fronteira é utilizado em casos onde há repetição espacial do escoamento.

3.3.5 Paredes internas e blocos

As paredes internas e os blocos são barreiras que obstruem a passagem do fluido e podem ser modelados como uma região com velocidade igual a zero e cujas superfícies são aplicadas as condições de contorno para as paredes.

Sendo assim, cada face das barreiras no interior do domínio de simulação necessitam utilizar pelo menos duas fileiras de células em cada face por causa da presença da *dummy cell*.

Para acelerar o cálculo as células dentro do bloco são excluídas da etapa iterativa de ajuste das pressões, pois estas não contribuem aos resultados do fluxo principal.

Ao aplicar as condições de contorno de parede rígida nas células de canto da barreira interna surgem dificuldades adicionais, pois quando aplicamos a técnica de

reflexão alguns valores são sobrescritos nas *dummy cells* do canto. Em outras palavras quando se faz o tratamento do canto, uma das superfícies sobrescreve valores na superfície perpendicular a esta, gerando um conflito que exige um tratamento mais específico.

No presente trabalho o conflito é resolvido dando prioridade absoluta a condição de velocidade normal a parede ser igual a zero, conforme a Figura 3.5.

Figura 3.5 – (a) problema da aplicação da técnica de reflexão no canto
(b) condição aplicada no simulador

3.3.6 Janelas e portas

Ao aplicar as condições de parede rígida e de saída na mesma face do domínio surgem conflitos na definição da condição de contorno, e como medida para contornar o problema foi necessário modelar as aberturas de saída como vazios de uma antepara que divide o ambiente interno do externo. A Figura 3.6 mostra as duas possibilidades de fazer a modelagem:

- 1- Antepara esbelta com abertura simples.
- 2- Antepara espessa formando um ducto.

Figura 3.6 – Condição de saída com antepara esbelta (esquerda) e com antepara espessa (direita)

O modelo simulado é uma sala quadrada de 3,0 x 3,0 x 2,75 m e malha com espaçamento constante Δx , Δy e Δz de 0,05 m, as aberturas situam-se a 1,2 m do piso, estão centradas lateralmente na parede, têm dimensões de 0,8 x 0,8 m e estão alinhadas.

Variando a dimensão X mostrada na Figura 3.6, foi verificado o impacto do aumento do domínio computacional no tempo total de simulação. Como na situação de antepara espessa há menos células a serem calculadas, o tempo de cálculo é reduzido em relação à parede esbelta, conforme Figura 3.7. Foi verificado também que para as diversas dimensões simuladas não houve divergência no cálculo e as perturbações devido a fronteira de saída e a parede foram imperceptíveis como pode ser visto na Tabela 3.1.

Figura 3.7 – Influência da dimensão X da antepara no tempo de simulação

Tabela 3.1 – Influência da distância entre a janelas de saída do ar e a extremidade do domínio de simulação. Campo de velocidade no plano longitudinal ao escoamento

Para verificar o impacto de cada uma das alternativas na pressão, foi posicionado um sensor de pressão que monitorou as variações a 1,0 m do centro da abertura de entrada e são mostradas na Figura 3.8. Observa-se que nos dois casos, quanto maior a distância X utilizada para a condição de contorno, maiores são as variações de pressão na fase de aceleração. Após o amortecimento dessas variações, a pressão resultante do fluxo é igual para todos os casos.

Figura 3.8 – Influência da espessura da parede na pressão

Ainda analisando os resultados da Figura 3.8, observa-se que o uso da parede esbelta é mais estável, produzindo oscilações menores de pressão e portanto será utilizado nos casos a serem simulados.

3.4 CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais de simulação são as de um ambiente estático onde as velocidades são nulas e a pressão aplicada no ambiente é igual a pressão estática de uma atmosfera.

A pressão utilizada no cálculo do método tem uma peculiaridade, a pressão de referência é situada no piso, tornando-se negativa à medida que se aumenta a altura. Esta peculiaridade não tem interferência direta na simulação, pois para o estudo do fenômeno a variável de interesse é a componente dinâmica da pressão. Por isso a variável principal é a diferença de pressão e não a pressão absoluta.

3.5 MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

A turbulência ocorre quando as forças viscosas são superadas pelas forças de inércia do fluido, em decorrência disto surgem rápidas variações de velocidade e

pressão e o fluxo se torna inerentemente tridimensional instável (WILCOX, 2004), a Figura 3.9 ilustra um caso típico de escoamento turbulento causado pelo fluxo de ar ao redor de um cubo, visto em corte no plano vertical de simetria. Na figura a cor vermelha indica as regiões de maior velocidade e em azul as de menor velocidade. Observa-se que na região da esteira do escoamento, destacada em azul na parte inferior da figura logo após o cubo, existem varias estruturas em forma ovalar que identificam os vórtices formados pelo escoamento ao redor do prisma e indicam a instabilidade do escoamento devido a turbulência.

Figura 3.9 – Formação de vórtices atrás de um prisma quadrado

Muito tem sido pesquisado e escrito sobre a turbulência, porém ainda falta muito a ser compreendido sobre o fenômeno da turbulência para diversas aplicações. A turbulência em si é difícil de ser definida, sendo melhor descrita de forma geral por algumas de suas características (TENNEKES; LUMLEY, 1972):

- Irregularidade ou aleatoriedade;
- Alta difusividade;
- Número de Reynolds elevado;
- Flutuações tridimensionais de vorticidade;
- Dissipação
- Continuidade

A forma mais precisa de simular um escoamento seja laminar ou turbulento é a simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* – DNS), que utiliza a resolução direta das equações de Navier-Stokes. Porém para este tipo de simulação é necessário que se tenha uma discretização do domínio suficientemente refinada para captar os menores vórtices dentro do escoamento, o que resulta numa malha extremamente fina, consumindo um esforço computacional gigantesco mesmo para os computadores atuais.

Uma das primeiras tentativas de simular a turbulência foi proposta por Boussinesq, que introduziu o conceito de viscosidade do turbilhão (*eddy-viscosity*), este conceito tenta utilizar a teoria do processo de difusão molecular para estimar o fluxo turbulento.

Reynolds então utilizou a média temporal nas equações de Navier-Stokes para separar o fluxo turbulento em duas partes, uma com o valor médio das principais variáveis e outra contendo a parte variável onde residem os efeitos da turbulência. Estas equações são chamadas de Navier-Stokes por média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS) que até hoje são as mais aplicadas para a simulação numérica de escoamentos turbulentos.

As equações RANS só vieram a ter uma forma de solução com a descoberta da camada limite por Prandtl que introduziu o conceito de comprimento de mistura, uma forma análoga ao caminho médio livre de um gás. Com base na hipótese do comprimento de mistura foi criado o primeiro modelo de turbulência que é denominado modelo de zero-equação ou modelo algébrico, por não ser necessária a resolução de nenhuma equação diferencial extra.

Para melhorar a previsão de propriedades do fluxo turbulento Prandtl propôs outro modelo, onde a viscosidade do turbilhão depende da energia cinética da turbulência, sendo criado então o modelo de turbulência de uma equação. Apesar de não invalidar os seus resultados para alguns tipos de escoamentos, este tipo de modelo é incompleto por não fornecer um fechamento dimensional das variáveis.

Depois disso surgiram modelos com um fechamento teórico mais rigoroso, os modelos de turbulência de duas equações, como o $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ entre outros, porém por terem uma complexidade computacional relativamente alta estes modelos

somente conseguiram grandes avanços com o aumento da capacidade de processamento dos computadores.

Uma outra abordagem da turbulência foi feita utilizando um tensor que representa as tensões turbulentas em um elemento de fluido, chamado de tensor de tensões de Reynolds. Estes modelos chamados de modelo de transporte de tensões de Reynolds (*Reynolds Stress-transport Model – RSM*) conseguem se adaptar a diversas condições de contorno com facilidade devido a sua formulação introduzindo naturalmente variáveis de difícil parametrização. Porém este modelo utiliza muito mais intensamente os computadores para sua resolução, pois adiciona sete equações diferenciais de transporte sendo uma para um constituinte da turbulência e seis para as tensões de Reynolds (WILCOX, 2004).

Um outro método também muito utilizado para modelar a turbulência é o Large Eddy Simulation (LES), as equações deste método são muito parecidas com a do modelo $k - \varepsilon$, a diferença está no fato dele se basear na filtragem dos turbilhões produzidos no escoamento. Esta filtragem faz com que os turbilhões menores, que não poderiam ser corretamente simulados devido à dimensão da malha, sejam modelados por equações específicas.

Neste trabalho, devido a simplicidade de implementação e menor custo computacional, foi adotado um modelo de zero equação para simular a turbulência, que é baseada na teoria do comprimento de mistura de Prandtl, onde as influências da turbulência são transformadas em viscosidade turbulenta e esta é adicionada a viscosidade laminar do fluido resultando em uma viscosidade efetiva que será utilizada nos cálculos.

Utilizando-se a hipótese de Prandtl-Kolmogorov a viscosidade turbulenta pode ser obtida pela eq. (11).

$$\mu_t = C_v \rho k^{1/2} l \quad (11)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta (m^2/s^2), l é uma escala de comprimento apropriada para as interações turbulentas (m), ρ é a densidade do meio (kg/m^3) e C_v é uma constante empírica.

Chen e Xu (1998) aperfeiçoaram um modelo de zero-equações voltado para a ventilação interna de salas. Modificando o coeficiente C_v e utilizando a velocidade média local V (m/s) substituindo a energia cinética para o cálculo da viscosidade turbulenta foi obtida a eq. (12), utilizada neste trabalho.

$$\mu_t = 0,03874\rho V l \quad (12)$$

4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é apresentado um estudo de validação do método de simulação em desenvolvimento, comparando-se os resultados obtidos com os resultados numéricos e experimentais publicados por outros autores.

Para possibilitar a comparação e análise dos resultados com os obtidos por outros autores, foi utilizado o adimensional coeficiente de pressão que é dado pela equação:

$$C_p = \frac{(P_s - P_r)}{\frac{1}{2} \rho U_r^2}$$

onde:

P_s é a pressão na superfície de medição;

P_r e U_r são a pressão e a velocidade de referência (valores medidos na região não perturbada);

ρ é a densidade do fluido.

Também será feita uma análise de alguns fatores que podem influenciar no resultado da simulação, como a proximidade das paredes laterais e o modo como o ar é acelerado até atingir a velocidade de simulação.

4.1 ESCOAMENTO EXTERNO EM TORNO DE UM PRISMA DE COMPRIMENTO INFINITO

O escoamento bidimensional é um caso particular do escoamento tridimensional, onde os efeitos mais significativos são paralelos ao plano do escoamento e os efeitos perpendiculares podem ser desprezados. A fim de verificar o desempenho básico da versão 3D do programa de simulação, foram executadas simulações baseadas no escoamento bidimensional em torno de um prisma, e os resultados são comparados com aqueles obtidos pela versão 2D.

O caso consiste em um prisma de 10 células de altura (h) por 10 células de profundidade, o domínio de simulação tem $12h$ de comprimento por $4h$ de altura, conforme mostra a Figura 4.1. O prisma se localiza a $2h$ da entrada de ar e $9h$ da saída de ar, de modo a evitar a influência das condições de entrada e saída de fluido no escoamento. Foram simulados casos com diversas larguras de modo a avaliar a interferência das paredes laterais, com condições *free-slip* no escoamento.

Figura 4.1 – Modelo de simulação do escoamento bidimensional em torno de um prisma com profundidade L variável

Figura 4.2 – Coeficientes de pressão na face de vento incidente

Pode-se verificar por meio do gráfico representado na Figura 4.2, que os coeficientes de pressão obtidos são praticamente idênticos e os resultados não se alteram com o aumento da largura do domínio computacional, mostrando a bidimensionalidade do problema reproduzida pela versão 3D do programa.

4.2 EFEITO DA PAREDE NO ESCOAMENTO

Nos casos de escoamento ao redor de corpos simples, geralmente são comparados resultados de pressão e velocidade em ambientes abertos considerando apenas a influência do piso no escoamento. Porém para a análise experimental em túnel de vento, a seção transversal impõe uma limitação no tamanho do modelo a ser utilizado, que se maior poderia funcionar como um pistão alterando as medidas de pressão e comprometendo a comparação com outros experimentos. No caso das simulações o domínio de cálculo não pode ser infinito como seria o ideal e a presença do limites do domínio também pode influenciar os resultados. No entanto do ponto de vista do tempo de processamento, também não é desejável aumentar exageradamente o domínio de cálculo. Sendo assim uma análise do efeito da distância entre o objeto até o limite do domínio é necessário para estabelecer um domínio de cálculo otimizado tanto na precisão dos resultados como na eficiência da computação.

Uma medida de quanto um corpo estaria bloqueando o fluxo, chamada taxa de bloqueio, é dada pela relação entre a seção transversal do modelo e a seção transversal do túnel, quanto menor essa relação menor o efeito do bloqueio.

Para avaliar o efeito da proximidade dos limites laterais do domínio de cálculo, que foi modelado como parede rígida tipo *free-slip*, foi utilizado como base o caso de escoamento ao redor de um cubo de aresta h , Figura 4.3. Este caso foi simulado utilizando distâncias (L) entre o cubo e os limites do domínio e taxas de bloqueio conforme a Tabela 4.1

Figura 4.3 – Caso: cubo sobre uma superfície

Tabela 4.1 – Taxas de bloqueio utilizadas na simulação

Distância (L)	Taxa de bloqueio
h	$1/6 = 16,7\%$
$2h$	$1/15 = 6,7\%$
$3h$	$1/28 = 3,6\%$
$4h$	$1/45 = 2,2\%$

Pode-se observar no gráfico da Figura 4.4 que o efeito da presença dos limites do domínio de cálculo é notado na configuração com distância entre o cubo e as paredes $L=1h$, sendo reduzido com o aumento desta distância. A variação no coeficiente de pressão quando se aumenta L de $2h$ para $3h$ é muito pequena e praticamente não se altera entre $3h$ e $4h$.

Figura 4.4 – A influência da distância do limite do domínio de cálculo sobre o coeficiente de pressão nas faces laterais do cubo

Com base neste resultado pode-se concluir que a influência da distância do limite do domínio de cálculo é desprezível para distância L superior a $2h$, e este valor deve ser adotado nas simulações para assegurar a precisão dos resultados.

4.3 INFLUÊNCIA DO MODO DE ACELERAÇÃO

Nas primeiras simulações, partindo do estado inicial em repouso, foi utilizado um perfil de aceleração constante para as velocidades impostas na fronteira de entrada até um tempo de referência, quando fluxo de entrada atinge a sua velocidade de regime v_{ref} . A equação da cinemática que rege esta aceleração é dada pela eq. (13)

$$v = a \cdot t \text{ para } 0 \leq t \leq t_{ref} \quad (13)$$

Onde:

v é a velocidade instantânea do fluxo de entrada (m/s);

a é a aceleração (m/s²);

t é o instante de tempo (s);

t_{ref} é o tempo de referência até o qual o fluido será acelerado (s).

Durante este período de transiente todo o fluido é submetido a mesma aceleração instantânea a para auxiliar o sistema a atingir a velocidade de regime v_{ref} , o efeito desta aceleração é considerado no sistema com a inclusão de um termo de força externa na equação de conservação de momento.

No entanto os testes realizados indicam que esta abordagem resulta num grande número de iterações nos instantes próximos do tempo zero e do tempo de referência t_{ref} , por certas vezes chegando a atingir o número máximo de iterações estabelecido para o cálculo de convergência, prejudicando a precisão da simulação.

Para atenuar este problema foi experimentado um perfil de velocidade senoidal, regido pela eq. (14), iniciando com velocidade zero aumentando gradualmente a velocidade até que no tempo de referência t_{ref} atinja a velocidade de regime v_{ref} . A

Figura 4.5 mostra a velocidade em relação ao tempo para os dois perfis de aceleração.

$$v = v_{ref} \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\pi \frac{t}{t_{ref}} \right) \right) \quad (14)$$

A fim de verificar o desempenho das curvas de aceleração, o caso do escoamento externo a um cubo sobre uma superfície, descrito na seção 4.4 foi utilizado junto com as etapas de validação do sistema, para avaliação da eficácia do perfil sugerido.

Figura 4.5 – Comparação entre os perfis de velocidade utilizados na transição entre a condição inicial e o regime permanente

A Figura 4.6 mostra o comportamento do número de iterações em cada *time-step* ao longo da simulação com aceleração constante e com aceleração senoidal. Na simulação utilizando aceleração constante pode-se notar que o cálculo tornou-se bastante instável com uma flutuação muito grande do número de iterações. Próximos ao instante zero e ao tempo de referência chegam a atingir muitas vezes o limite máximo estabelecido para o número de iterações. No caso da aceleração senoidal verificou-se que os números das iterações praticamente não diferem do restante da simulação e a amplitude da variação do número de ciclos é relativamente pequeno. Este comportamento mais estável da computação permite que seja utilizado um *time-step* maior e com isto ganha-se um tempo considerável na simulação e poupando recursos computacionais.

Figura 4.6 – Série temporal do número de iterações de cada ciclo para o perfil de velocidade linear (a) e senoidal (b)

4.4 ESCOAMENTO EXTERNO EM TORNO DE UM CUBO

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 4.7 mostra os vórtices que se formam neste tipo de escoamento e que podem mudar a forma e tamanho proporcionalmente a velocidade do escoamento.

Figura 4.7 – 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 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, ou seja $U(Z) = U_{\infty} (Z/2h)^{1/7}$ para $Z < 2h$ e $U(Z) = U_{\infty}$ para $Z \geq 2h$

Para comparar os resultados foram executadas simulações com o programa 2D utilizando uma malha de 260 x 80 células com espaçamento regular $\Delta x = \Delta y = h/20$, onde h é o lado do cubo. Para o programa tridimensional, devido a limitações computacionais, foi utilizada uma malha mais grosseira de 120 x 70 x 40 com um espaçamento regular de $\Delta x = \Delta y = h/10$. Para ambos os casos o *time-step* adotado é de $\Delta t = 0,01$ e os primeiros 4 segundos da simulação utilizados para o aumento gradual da velocidade de incidência do vento.

As simulações foram executadas em um computador pessoal com processador Athlon XP 1800+ e 256 Mb de memória RAM, rodando o sistema operacional RedHat Linux 9.0, os tempos de processamento do caso 2D foram em média 22 minutos enquanto o caso 3D foi de 23 horas.

Em uma primeira análise, avaliando qualitativamente o campo de velocidades obtido no plano de simetria na versão 3D, comparados com os campos obtidos da versão 2D e apresentados da Figura 4.8, os casos simulados apresentam uma boa aproximação na determinação dos vórtices no topo e na face de jusante do cubo.

(a) LES

(b) versão 2D

(c) versão 3D

→ 1 m/s

Figura 4.8 – Comparação entre campos de velocidade obtidos pelo cálculo 2D com LES (Ayad, 1999) (a), cálculo 2D do programa implementado (b) e cálculo 3D do programa implementado (c)

A Figura 4.9 mostra uma comparação entre os perfis de pressão na face barlavento obtidos experimentalmente (Castro; Robins, 1977), por simulação LES 2D (Ayad, 1999) e pelas versões 2D e 3D do programa implementado. Ressalta-se que a versão 2D do programa implementado não possui modelo de turbulência.

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

Figura 4.9 – Coeficientes de pressão para os casos simulados

5 ANÁLISE DA VENTILAÇÃO POR MEIO DE SEÇÕES

Com o simulador fornecendo valores compatíveis e próximos aos resultados experimentalmente e computacionalmente obtidos por outros autores, apresenta-se neste capítulo o estudo da ventilação em salas de diversas configurações e o estudo de índices de ventilação para análise das condições gerais de ventilação dentro de salas encontradas em habitações utilizando o simulador implementado. Os resultados são sintetizados na forma de uma distribuição de índices de ventilação.

5.1 ANÁLISE DA VENTILAÇÃO EM SALAS

Em uma segunda etapa de seu estudo Ayad (1999) utilizou o mesmo programa de simulação para salas com configurações de aberturas variadas. Neste capítulo foram tomadas as plantas da Figura 5.1 como casos para comparação.

Figura 5.1 – Casos utilizados na simulação de ventilação dentro de salas

As simulações foram executadas tanto no modelo bidimensional quanto no tridimensional, os resultados dos campos de velocidade são mostrados na Figura 5.2. O modelo bidimensional foi simulado utilizando uma malha de 80x40 células igualmente espaçadas, tomando proveito da simetria do problema. O modelo tridimensional inteiro foi simulado em uma malha de 64x64x32 células, sendo que o plano horizontal de corte para apresentação do campo de velocidades é situado no plano longitudinal de simetria.

Figura 5.2 – Campos de velocidade obtidos pelos métodos LES (Ayad,1999) e versões 2D e 3D do programa implementado para o caso A, B e C.

Pelos campos de velocidade apresentados nota-se que para os casos A e B tanto o modelo 2D quanto 3D são muito próximos. Já para o caso C nota-se que o fluxo calculado com o modelo 3D se comporta de um modo diferente ao modelo 2D e LES na proximidade da saída do ar, onde há um fluxo perpendicular ao plano de corte formado pelo espalhamento do ar ao bater na parede.

5.2 ÍNDICES DE VENTILAÇÃO

A Federação das Associações Europeias 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 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.

$$CRE = \frac{\text{concentração na saída}}{\text{concentração média na sala}}$$

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 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.

$$ACE = \frac{\text{menor tempo possível de troca de ar}}{\text{atual tempo de troca de ar}}$$

Este índice é melhor empregado no estágio de projeto, quando o leiaute do ambiente ainda não é definido.

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.

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 nas medições de velocidade feitas por Givoni (1962) pode-se criar um índice para análise da ventilação relacionando a velocidade do ar na abertura de entrada com a velocidade média dentro do ambiente. Este índice será referido por velocidade média modular (MOTEZUKI; CHENG, 2004; MOTEZUKI; CHENG; PIPINEL, 2005) sendo calculado conforme a equação abaixo.

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

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.

O índice foi aplicado no estudo de aberturas de entrada e saída de ar em diversas posições e os efeitos na ventilação de uma sala retangular de 60 cm x 30 cm. Para cada configuração proposta foi também estudado o impacto do aumento da abertura de saída em 50% (MOTEZUKI; CHENG, 2004). Os casos estudados são apresentados na Figura 5.3.

A Figura 5.4 apresenta os resultados numéricos obtidos dos casos estudados. Da figura verifica-se que o valor do índice velocidade média modular reflete bem o padrão de circulação de ar da sala. O valor do índice é pequeno nas regiões onde ocorre a estagnação, e é grande na linha entre as aberturas de entrada e saída. Sendo assim, o índice foi adotado como parâmetro de análise no estudo da ventilação cruzada em salas que serão feitas a seguir.

Caso 1

Caso 2

Caso 3

Caso 4

Caso 5

Caso 6

Caso 7

Caso 8

Caso 9

Caso 10

Caso 11

Caso 12

Figura 5.3 – Configurações estudadas

0,062	0,310	0,441
0,073	0,286	0,414
0,887	1,035	1,086

Caso 1

0,062	0,312	0,446
0,073	0,288	0,421
0,888	1,035	1,067

Caso 2

0,150	0,546	0,569
0,149	0,379	0,740
0,909	1,074	0,758

Caso 3

0,160	0,556	0,648
0,156	0,383	0,726
0,911	1,076	0,745

Caso 4

0,171	0,561	0,710
0,165	0,387	0,711
0,914	1,075	0,726

Caso 5

0,176	0,556	0,679
0,169	0,387	0,698
0,915	1,070	0,707

Caso 6

0,950	0,363	0,048
0,457	0,390	0,058
1,004	0,378	0,053

Caso 7

0,901	0,331	0,044
0,480	0,360	0,052
0,989	0,344	0,047

Caso 8

0,951	0,407	0,053
0,454	0,427	0,064
1,030	0,420	0,058

Caso 9

0,896	0,432	0,056
0,452	0,442	0,068
1,038	0,441	0,082

Caso 10

0,059	0,295	0,432
0,069	0,276	0,409
0,886	1,032	1,012

Caso 11

0,056	0,279	0,425
0,066	0,268	0,406
0,885	1,029	0,948

Caso 12

Figura 5.4 – Velocidade média modular nos setores

Para o estudo foram modeladas duas salas quadradas onde a abertura de entrada de ar de ambos os modelos é situado próximo à parede adjacente esquerda e a abertura de saída de ar dos modelos situa-se na parede oposta à de entrada, porém

cada um junto a uma parede adjacente distinta de modo a forçar o desvio do fluxo de ar dentro da sala, ilustradas na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Modelos utilizados no estudo da ventilação cruzada

A variação da abertura de saída foi executada iniciando em 1/3 da área da parede até a sua totalidade em passos de 1/3 da área da parede, destaca-se que no caso de abertura total, ambos os casos terão configurações idênticas. Um resumo dos casos estudados é mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resumo dos casos estudados

Casos	Abertura de entrada	Abertura de saída
A1	1/3	1/3
A2	1/3	2/3
A3	1/3	3/3
B1	1/3	1/3
B2	1/3	2/3
B3	1/3	3/3

Os resultados deste estudo, exibidos na Tabela 5.2, mostram que na ventilação cruzada com aberturas de entrada e saída de ar na mesma parede adjacente, o fluxo de ar fica concentrado na área entre as aberturas enquanto que nas outras regiões o fluxo é predominantemente de recirculação. Já no caso onde as aberturas situam-se em paredes adjacentes opostas há uma redução significativa na área das regiões onde há recirculação.

Tabela 5.2 – As razões entre a velocidade média modular e a velocidade de ar na entrada obtidas para os casos de ventilação cruzada sem desvio e com desvio

Ventilação cruzada sem desvio	Ventilação cruzada com desvio																		
<table><tr><td>1,01</td><td>1,02</td><td>1,01</td></tr><tr><td>0,16</td><td>0,11</td><td>0,17</td></tr><tr><td>0,17</td><td>0,13</td><td>0,17</td></tr></table> <p>Caso A1</p>	1,01	1,02	1,01	0,16	0,11	0,17	0,17	0,13	0,17	<table><tr><td>1,02</td><td>0,85</td><td>0,44</td></tr><tr><td>0,44</td><td>0,69</td><td>0,95</td></tr><tr><td>0,47</td><td>0,43</td><td>0,86</td></tr></table> <p>Caso B1</p>	1,02	0,85	0,44	0,44	0,69	0,95	0,47	0,43	0,86
1,01	1,02	1,01																	
0,16	0,11	0,17																	
0,17	0,13	0,17																	
1,02	0,85	0,44																	
0,44	0,69	0,95																	
0,47	0,43	0,86																	
<table><tr><td>1,01</td><td>1,02</td><td>1,00</td></tr><tr><td>0,21</td><td>0,22</td><td>0,20</td></tr><tr><td>0,20</td><td>0,24</td><td>0,26</td></tr></table> <p>Caso A2</p>	1,01	1,02	1,00	0,21	0,22	0,20	0,20	0,24	0,26	<table><tr><td>1,03</td><td>0,94</td><td>0,56</td></tr><tr><td>0,47</td><td>0,56</td><td>0,99</td></tr><tr><td>0,50</td><td>0,45</td><td>0,52</td></tr></table> <p>Caso B2</p>	1,03	0,94	0,56	0,47	0,56	0,99	0,50	0,45	0,52
1,01	1,02	1,00																	
0,21	0,22	0,20																	
0,20	0,24	0,26																	
1,03	0,94	0,56																	
0,47	0,56	0,99																	
0,50	0,45	0,52																	
<table><tr><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,07</td><td>0,07</td></tr><tr><td>0,02</td><td>0,06</td><td>0,06</td></tr></table> <p>Caso A3</p>	1,00	1,00	1,00	0,05	0,07	0,07	0,02	0,06	0,06	<table><tr><td>1,00</td><td>1,00</td><td>1,00</td></tr><tr><td>0,05</td><td>0,07</td><td>0,07</td></tr><tr><td>0,02</td><td>0,06</td><td>0,06</td></tr></table> <p>Caso B3</p>	1,00	1,00	1,00	0,05	0,07	0,07	0,02	0,06	0,06
1,00	1,00	1,00																	
0,05	0,07	0,07																	
0,02	0,06	0,06																	
1,00	1,00	1,00																	
0,05	0,07	0,07																	
0,02	0,06	0,06																	

A Figura 5.6 apresenta a relação entre a dimensão da abertura e a velocidade média modular geral, que é obtido considerando todo o volume da sala, das configurações A (sem desvio) e B (com desvio). Da curva do caso A (sem desvio) verificou-se que o aumento da abertura de saída, de 1/3 para 2/3 da área da parede, aparentemente beneficiou o caso sem desvio do fluxo de ar, entretanto este aumento é muito pequeno, da ordem de 0,04 e por isso não conclusivo.

O caso B (com desvio) obteve maiores índices gerais em relação ao caso A exceto pelos casos A3 e B3, que são configurações idênticas com abertura total. Nestes casos não houve benefícios para a circulação de ar, mostrando que existe um limite para o aumento da dimensão da abertura de saída.

Figura 5.6 – Resultado da análise da velocidade média modular geral.

Com isto pode-se afirmar que o desvio do fluxo de ar neste tipo de configuração provê uma melhor distribuição de ar fresco dentro do ambiente pela redução das áreas de recirculação.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÃO

Devido a natureza tridimensional das análises a serem realizadas, a partir deste item somente será utilizado o simulador tridimensional.

Utilizando o conceito de velocidade média modular e os casos experimentais de Givoni (1962), foi possível comparar os resultados do simulador para avaliar a ventilação de um modo geral em uma sala. Escolheu-se a configuração da Figura 5.7 para mostrar esta comparação, 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. A Figura 5.8 mostra os resultados computacionais obtidos utilizando o modelo 3D utilizado na simulação, as dimensões estão acordo com o modelo utilizado no experimento em túnel de vento.

A Figura 5.9 mostra o modelo experimental na configuração de aberturas alinhadas. 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 5.7 – Configuração 2D de aberturas e paredes utilizada como base para a análise dos efeitos 3D

Figura 5.8 – Modelo tridimensional simulado

Figura 5.9 – Modelo utilizado por Givoni (1962) em túnel de vento

Os números mostrados na Figura 5.10 mostram a velocidade média modular calculada desde o piso até o teto para uma determinada região vista em planta. Na Figura 5.11 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 não há interferência humana e, portanto tem um peso bem menor no estudo da ventilação para conforto. Nestas figuras foram destacados em azul os índices de velocidade média que diferem em até 10%, em verde as que diferem entre 10% e 20% e em vermelho as que diferem mais de 20% dos valores medidos por Givoni (1962).

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 é 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 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), Figura 5.12, é possível observar que experimentalmente se obteve um maior espalhamento do jato de ar. Comparando-se a velocidade próxima a abertura de entrada é notável a proximidade com os valores da Figura 5.10.

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%

Figura 5.10 – Velocidade média considerando toda seção da edificação (altura total)

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%

Figura 5.11 – Velocidade média considerando apenas a zona ocupada (até 1,8m)

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

Figura 5.12– Velocidades observadas por Givoni

Ainda utilizando os resultados da Figura 5.10 e Figura 5.11, reduziu-se o número de seções e, tomando apenas um dos lados simétricos da sala, os resultados foram

confrontados com o obtido em 2D na Figura 5.4 caso 4. Colocando lado a lado estes resultados na Figura 5.13 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	0,726
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 5.13 – Comparação das velocidade médias modulares entre os casos 2D e 3D.

6 DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO SIMPLIFICADO PARA A ANÁLISE DE VENTILAÇÃO

Os resultados obtidos nos capítulos anteriores mostraram que as técnicas de simulação computacional permitem obter uma previsão satisfatória da ventilação nas edificações. No entanto, estas técnicas estão ainda distantes da aplicação prática no dia-dia dos arquitetos projetistas por diversos motivos. Entre os quais, pode-se citar a capacidade de processamento e a aplicação correta de diversos parâmetros de simulação: para um mesmo caso e utilizando o mesmo código, os resultados podem ser diferentes ou até inválidos quando parâmetros numéricos de simulação são utilizados erroneamente.

A definição destes parâmetros, tais como a discretização de tempo e de espaço, os parâmetros de convergência, as distâncias mínimas até o contorno do domínio de cálculo, exigem um conhecimento sólido sobre as técnicas numéricas, além de experiências práticas de simulação.

Dentro deste contexto surge a necessidade de desenvolver uma ferramenta computacional simples e prática, que auxilie os projetistas na análise da ventilação, mas sem envolvê-los na complexidade de uma simulação computacional. Neste capítulo, na tentativa de preencher esta lacuna, é apresentado um esboço inicial de uma ferramenta do gênero, cuja metodologia será detalhada nos itens a seguir.

6.1 METODOLOGIA

Uma idéia gerada do estudo do capítulo anterior, sobre a análise da ventilação por meio do índice de velocidade média modular, é aplicar técnicas de reconhecimento de padrões para encontrar as configurações mais eficazes das aberturas para atender a necessidade de um determinado leiaute interno.

Conforme visto no capítulo 5, o índice de velocidade média modular reflete de forma eficaz o padrão de circulação de ar dentro de um ambiente em função do

posicionamento das aberturas de entrada e saída. Sendo assim, ao invés de executar as simulações computacionais para cada caso novo em estudo, pode-se identificar e estabelecer algumas configurações típicas das aberturas. As simulações podem ser executadas previamente e os resultados de cada configuração sintetizados e tabulados na forma de distribuição da velocidade média modular, conforme mostrado na Figura 6.1 e armazenados num banco de dados.

A cada novo leiaute considerado no projeto é possível dividir o espaço em regiões menores e definir um índice que reflete a demanda pela circulação de ar. A confrontação dos índices da demanda de cada região do leiaute contra os índices de velocidade média modular de cada configuração típica, nas respectivas regiões, permite a identificação e seleção da configuração de aberturas otimizada para o leiaute em estudo, levando-se em conta o arranjo dos móveis e os requisitos de cada região do ambiente em relação a velocidade de ar, que dependem do uso e demais atributos da região.

A Figura 6.1 mostra o processo da análise e avaliação da ferramenta proposta. Algumas configurações típicas das aberturas já foram mostradas e estudadas no capítulo anterior (Figura 5.3). No item 6.2 são apresentados alguns leiautes mais comuns, baseados nas plantas arquitetônicas. Por questão de simplicidade, os ambientes de estudo são limitados a dormitórios. Depois disso, será apresentado um índice de demanda utilizado na confrontação entre o leiaute e as configurações típicas das aberturas. E no final, apresentam-se alguns resultados iniciais da aplicação da ferramenta, com o objetivo de ilustrar o procedimento da análise.

Figura 6.1 – Processo de análise da ferramenta proposta

6.2 ANÁLISE DAS PLANTAS ARQUITETÔNICAS

Como ponto de partida do desenvolvimento da ferramenta de projeto, por questão de simplicidade, procurou-se focar na análise de ventilação dos dormitórios, mesmo para este ambiente com funções bem definidas existe uma variedade muito grande de leiautes. Partiu-se então de uma análise das plantas arquitetônicas com o objetivo de sistematizá-las.

Para casos típicos a análise das plantas arquitetônicas dos dormitórios foram levantados alguns casos mostrados na Tabela 6.1 e descritos a seguir. Simplificando o problema ao máximo de modo a permitir algumas análises elementares, foi assumido que a ventilação se dá com entrada de ar pela janela e saída pela porta.

Os casos 1 e 2, apesar de terem praticamente as mesmas dimensões e mesma posição da porta, diferem na posição da janela, no caso 1 centrada na parede e no caso 2 deslocada à esquerda.

Os casos 3 e 4 têm dimensões bem diferentes, no entanto a razão de aspecto, que é a relação entre o comprimento e a largura do ambiente, é praticamente igual tendo em vista que, na essência, estes casos são simétricos e podem ser considerados como um único caso.

A partir da tabulação das plantas verificou-se que, apesar das dimensões variarem, há uma relação entre a largura e o comprimento do dormitório. A razão de aspecto segue uma faixa bem definida entre 0,6 a 0,8 e isto facilita a elaboração de um banco de dados de casos com configurações típicas uma vez que limita a forma dos ambientes para os formatos mais encontrados.

Tabela 6.1 – Configurações típicas de dormitórios

		Largura [m]	Comprimento [m]	Aspecto [L/C]	Configuração típica
Caso 1		2,60	4,10	0,63
Caso 2		2,60	4,15	0,63
Caso 3		2,40	3,10	0,77
Caso 4		3,00	3,80	0,79

6.3 ÍNDICE DE DEMANDA DE VENTILAÇÃO

Neste trabalho define-se o índice de demanda de ventilação como o índice que representa os requisitos de ventilação no sistema de avaliação com base no leiaute do ambiente. Este será o dado de entrada definido pelo projetista.

Tomando como exemplo a planta do caso 3 da Tabela 6.1 e destacada na Figura 6.2, um dormitório com duas camas, um criado mudo e um armário. Sobre as camas a demanda deve ser limitada, pois o excesso de velocidade do vento causa desconforto, já sobre o armário a demanda é praticamente nula uma vez que o próprio armário bloqueia grande parte do pé direito, o criado mudo, devido a sua dimensão reduzida e posicionamento, pode ser considerado como parte do corredor que por sua vez tem a função de servir como um eixo de referência da ventilação conduzindo o ar pelo ambiente em direção a saída.

Para efetuar a análise dos requisitos de ventilação a seguir serão apresentados dois critérios distintos para a comparação ambos variando de 0,0 a 1,0: de sem necessidade de ventilação a máxima necessidade de ventilação dentro de cada seção respectivamente.

- Máxima ventilação: o índice de demanda para as regiões não bloqueadas e onde se deseja ventilar é igual a 1,0 e para as regiões com bloqueio ou restrição severa é igual 0,0.
- Conforto: o índice de demanda em cada região depende do tipo de bloqueio existente nela, como para as regiões sobre a cama onde se pode requerer uma ventilação um pouco menor ou sobre uma escrivaninha ou área de serviço requerendo uma ventilação mais intensa. Os valores podem ser adaptados conforme necessidades e preferências específicas de cada usuário.

O critério de máxima ventilação é mais fácil de ser aplicado, uma vez que há poucas opções e decisões a serem tomadas, porém o ponto negativo deste método é que pode ocorrer desconforto gerado pelo excesso de vento em determinadas regiões onde deveria haver maior restrição na ventilação ou ainda insuficiência.

O critério de conforto é um pouco mais complexo em sua aplicação, devido a consideração de diversos fatores que podem ser utilizados para adaptar o fluxo de ar conforme as exigências do usuário ou projetista.

Uma comparação da leitura que cada um dos critérios apresentados faz do leiaute é apresentada na Figura 6.2.

Leiaute do ambiente

Critério de máxima ventilação

Critério de conforto

Figura 6.2 – Comparação entre os resultados obtidos utilizando dois critérios diferentes para o índice de demanda

Uma dificuldade encontrada trata da divisão do ambiente em regiões elementares para o cálculo dos índices. Para que a comparação seja possível, é necessário que tanto o índice de demanda quanto o índice de velocidade média modular adotem divisões semelhantes.

Para a escolha desta divisão foram consideradas as dimensões do ambiente, dos móveis, das aberturas e das pessoas. Uma divisão mais precisa seria obtida se fosse utilizada, por exemplo, a medida de 1 cm, contudo uma região tão pequena os índices perdem seu significado físico e a praticidade na avaliação da ventilação do ambiente. Analisando os critérios listados chegou-se a um valor da dimensão de cada divisão em torno de 50 cm, que representa bem os objetos considerados obstáculos à ventilação e que é uma medida razoável para representar o fluxo de ar no ambiente a ser estudado, além de ter uma dimensão próxima a projeção em planta de uma pessoa.

6.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Os critérios de seleção são as formulações adotadas para a comparação e escolha das simulações que melhor atendem aos requisitos dos usuários. Para isso escolheu-se um método simples, a soma dos mínimos quadrados, e outros mais

elaborados com a utilização da similaridade nebulosa, que é essencialmente uma forma generalizada do conceito de equivalência matemática (ZADEH, 1971).

De acordo com estes conceitos, a identidade se dará apenas pela equivalência de todas as seções, em geral isto não ocorre e o método indica dentre os avaliados aquele que obtiver maior grau de conformidade, portanto mais próximo, do parâmetro de avaliação.

6.4.1 Soma dos Mínimos Quadrados

Na soma dos mínimos quadrados, dada pela eq. (15), a diferença entre os valores em posições equivalentes na simulação e nos requisitos é elevado ao quadrado de modo a se obter sempre um valor positivo e quanto maior a diferença entre os valores, maior o impacto no valor da soma. Estes valores são somados e o resultado pode ser utilizado para comparação, quanto menor a soma, melhor é a aproximação.

$$S\langle A, B \rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{i,j} - B_{i,j})^2 \quad (15)$$

Onde $A_{i,j}$ e $B_{i,j}$ são os valores em cada seção.

6.4.2 Índice de conformidade (IC)

O índice de conformidade (IC) é um critério de comparação muito utilizado na lógica nebulosa (*Fuzzy Logic*). Ele estabelece um grau de semelhança entre dois elementos com base nos diversos atributos que definem as características dos elementos. Este grau de semelhança resulta da relação entre o que existe em comum entre os dois elementos, representado pela intersecção entre os dois e que pela lógica nebulosa é dada pela função mínimo, pelo conjunto formado por ambos, representado pela união e que é dada pela função máximo (CHENG, 2007).

O valor do IC, calculado conforme a eq. (16), varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1 for o valor, maior é o grau de semelhança ou afinidade entre os dois conjuntos. Portanto a configuração típica ótima para determinado tipo de leiaute será aquela que maximizar o IC.

$$IC = \begin{cases} \frac{1}{n * m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\min(A_{i,j}, B_{i,j})}{\max(A_{i,j}, B_{i,j})} & \text{p/ } A_{i,j} \neq 0 \text{ e } B_{i,j} \neq 0 \\ 1,0 & \text{p/ } A_{i,j} = B_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$A_{i,j} \in [1,0] \text{ e } B_{i,j} \in [1,0]$$

Onde:

$A_{i,j}$ e $B_{i,j}$ são os valores em cada seção;

n e m são o número de divisões nas direções x e y

Nota-se que no caso específico quando $A_{i,j}$ e $B_{i,j}$ são iguais a zero, sabe-se que o resultado deve ser igual a 1, uma vez que os dois valores são idênticos.

6.4.3 Máxima Similaridade na estrutura generalizada de Łukasiewicz

Luukka, Saastamoinen e Kõnönen (2001) elaboraram um método de classificação utilizando o conceito de estrutura de Łukasiewicz, que é a única estrutura de múltiplos valores onde a média de diversas similaridades nebulosas ainda é uma similaridade nebulosa.

A máxima similaridade na estrutura generalizada de Łukasiewicz que, por simplicidade, será chamada de máxima similaridade, é dada pela eq. (17)

$$S\langle x_1, x_2 \rangle = \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \sqrt[p]{1 - |x_1^p(f_i) - x_2^p(f_i)|}}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (17)$$

Onde:

$S\langle x_1, x_2 \rangle$ é o grau de similaridade entre os elementos

W_i é um peso diferente de zero para cada atributo i

$x_1(f_i)$ e $x_2(f_i)$ são os valores de x_1 e x_2 para o atributo f_i
 p é um número natural fixo

Na equação (17) tanto W_i quanto p podem ser definidos de modo a melhorar a sensibilidade do método. Para a comparação da simulação com os requisitos dos usuários a equação pode ser reescrita conforme a equação (18).

$$S\langle A, B \rangle = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{i,j} \sqrt[p]{1 - |A_{i,j}^p - B_{i,j}^p|}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{i,j}} \right) \quad (18)$$

Algumas seções que possuem restrições, como aquelas que contém aberturas e obstáculos grandes, são ponderadas da mesma forma que as seções livres de restrição o que pode levar o método a escolher uma configuração incompatível com estes requisitos físicos. Procurou-se incluir esta informação no processo de escolha da configuração mais adequada, aumentando o peso destas seções de modo que tenham uma avaliação diferenciada pelo método.

6.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE SELEÇÃO

Para a análise dos métodos de seleção foram utilizados alguns dos casos apresentados na seção 6.2 e os requisitos, de acordo com o critério de conforto, ilustrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Requisitos para os casos estudados

Casos

Requisitos

Caso 1

1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,0

Caso 2

1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0
1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,0

Caso 3

0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,0
0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,0

Nas figuras as seções com requisitos diferentes de 1,0 foram hachuradas para facilitar a visualização dos casos e a comparação dos resultados. Esta hachura será utilizada nas próximas tabelas onde serão apresentados os resultados para cada método de comparação.

Foram simuladas três configurações típicas para cada caso. Nestas configurações mudou-se apenas a posição da janela, pois uma vez definida as posições dos cômodos no pavimento, a posição da porta é difícil de ser modificada.

Nas análises a seguir o método de máxima similaridade foi empregado com e sem o uso de pesos para a avaliação diferenciada das seções com forte restrição e das seções livres de restrição. Optou-se por dobrar o peso das seções periféricas devido ao posicionamento das portas e janelas, onde obrigatoriamente os requisitos de ventilação devem ser iguais aos de um corredor, e o posicionamento dos armários, que geralmente são postos junto às paredes. A Figura 6.3 mostra os pesos utilizados para a análise dos casos.

2	2	2	2	2	2	2	2
2	1	1	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	1	1	2
2	2	2	2	2	2	2	2

(a)

2	2	2	2	2	2
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
2	2	2	2	2	2

(b)

Figura 6.3 – (a) Pesos utilizados nos casos 1 e 2 e (b) Pesos utilizados no caso 3

A Tabela 6.3 mostra que para o caso 1 a análise das configurações típicas pelos quatro métodos indicaram a terceira configuração típica como sendo a que tem uma melhor coerência com os requisitos definidos. Nesta configuração a janela fica posicionada próxima a parede onde se localiza a porta, isto faz com que o ar tenha maior facilidade para circular no ambiente do que sair, o que pode ser observado pela média das velocidades médias das seções de 0,62.

Tabela 6.3 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 1)

Configuração típica								Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso
1	0,26	0,30	0,35	0,39	0,45	0,64	0,72	6,76	0,573	0,284	0,271
	0,53	0,55	0,58	0,56	0,51	0,50	0,57				
	0,79	0,80	0,84	0,85	0,81	0,78	0,71				
	0,55	0,49	0,36	0,32	0,39	0,44	0,44				
	0,40	0,50	0,49	0,58	0,63	0,67	0,64				
Média = 0,55											
2	0,34	0,27	0,31	0,42	0,50	0,60	0,63	8,54	0,504	0,255	0,236
	0,30	0,27	0,30	0,36	0,33	0,32	0,32				
	0,25	0,29	0,33	0,40	0,42	0,40	0,44				
	0,64	0,70	0,75	0,77	0,81	0,83	0,80				
	0,68	0,75	0,84	0,90	0,93	0,91	0,82				
Média = 0,56											
3	0,62	0,65	0,70	0,77	0,94	1,00	0,80	4,84	0,663	0,326	0,313
	0,60	0,60	0,63	0,66	0,72	0,76	0,72				
	0,49	0,49	0,54	0,59	0,63	0,67	0,68				
	0,62	0,44	0,44	0,45	0,50	0,55	0,51				
	0,51	0,52	0,54	0,54	0,59	0,58	0,47				
Média = 0,62											

Porém na Tabela 6.4 a análise dos casos simulados em CFD com o dormitório mobiliado indicou certa diferença nas respostas obtidas por alguns métodos.

O método dos mínimos quadrados e o método da máxima similaridade sem peso apontou a configuração 2 como sendo a mais adequada, nesta configuração a janela fica próxima a parede oposta a da porta, o que aumenta o fluxo de ar sobre a cama próximo a cabeceira e facilita a saída do ar para os outros cômodos, uma vez que o

fluxo de ar chega perpendicular a abertura da porta, fato que não ocorria na configuração típica devido a ausência do armário.

O índice de conformidade indicou a primeira configuração, onde a abertura se localiza no meio da parede. Com isto aumenta-se significativamente o fluxo de ar sobre a cama, porém reduz a circulação de ar no ambiente e nos outros cômodos, observado pela velocidade média modular geral menor e pela baixa velocidade média na região da porta.

O método de máxima similaridade com peso indicou a configuração 3, a mesma que havia indicado quando avaliou as configurações sem o mobiliário.

Tabela 6.4 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 1)

	CFD	Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso
1	0,32 0,25 0,27 0,32 0,43 0,66 0,53 0,00	6,10	<u>0,657</u>	0,296	0,283
	0,51 0,52 0,46 0,45 0,49 0,64 0,43 0,00				
	0,70 0,72 0,68 0,61 0,59 0,63 0,35 0,00				
	0,58 0,45 0,32 0,23 0,26 0,57 0,41 0,00				
	0,35 0,35 0,38 0,42 0,41 0,54 0,36 0,00				
	Média = 0,40				
2	0,48 0,37 0,36 0,34 0,36 0,76 0,56 0,00	<u>5,09</u>	0,655	<u>0,312</u>	0,299
	0,41 0,26 0,20 0,15 0,26 0,77 0,57 0,00				
	0,37 0,29 0,22 0,25 0,38 0,85 0,53 0,00				
	0,69 0,64 0,57 0,57 0,63 0,83 0,42 0,00				
	0,74 0,73 0,57 0,48 0,45 0,64 0,38 0,00				
	Média = 0,43				
3	0,66 0,68 0,72 0,78 0,90 0,91 0,47 0,00	5,62	0,618	0,309	<u>0,308</u>
	0,64 0,61 0,55 0,56 0,59 0,62 0,38 0,00				
	0,33 0,24 0,14 0,13 0,19 0,34 0,44 0,00				
	0,36 0,26 0,18 0,17 0,23 0,46 0,38 0,00				
	0,39 0,40 0,36 0,37 0,35 0,43 0,32 0,00				
	Média = 0,39				

Na Tabela 6.5 observa-se que as escolhas dos métodos para as configurações típicas foram as mesmas que no caso 1, o que era esperado uma vez que as geometrias são parecidas e houveram poucas alterações nos requisitos.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 2)

	Configuração típica	Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso
1	0,26 0,30 0,35 0,39 0,45 0,64 0,72 0,67	6,84	0,578	0,285	0,270
	0,53 0,55 0,58 0,56 0,51 0,50 0,57 0,60				
	0,79 0,80 0,84 0,85 0,81 0,78 0,71 0,55				
	0,55 0,49 0,36 0,32 0,39 0,44 0,44 0,51				
	0,40 0,50 0,49 0,58 0,63 0,67 0,64 0,47				
	Média = 0,55				
2	0,34 0,27 0,31 0,42 0,50 0,60 0,63 0,54	8,55	0,500	0,252	0,234
	0,30 0,27 0,30 0,36 0,33 0,32 0,32 0,64				
	0,25 0,29 0,33 0,40 0,42 0,40 0,44 0,75				
	0,64 0,70 0,75 0,77 0,81 0,83 0,80 0,71				
	0,68 0,75 0,84 0,90 0,93 0,91 0,82 0,65				
	Média = 0,56				
3	0,62 0,65 0,70 0,77 0,94 1,00 0,80 0,69	5,15	0,649	0,318	0,307
	0,60 0,60 0,63 0,66 0,72 0,76 0,72 0,75				
	0,49 0,49 0,54 0,59 0,63 0,67 0,68 0,76				
	0,62 0,44 0,44 0,45 0,50 0,55 0,51 0,59				
	0,51 0,52 0,54 0,54 0,59 0,58 0,47 0,46				
	Média = 0,62				

As respostas obtidas pelos métodos para as simulações em CFD com o dormitório mobiliado, ilustradas na Tabela 6.6, mostram uma boa coerência nas respostas dos métodos de máxima similaridade, indicando uma configuração onde apesar da baixa velocidade média geral, permite uma melhor circulação nos outros ambientes. Enquanto que o método de mínimos quadrados e índice de conformidade indica a primeira configuração, onde o índice de ventilação sobre as camas é maior em detrimento da ventilação em outros cômodos.

Tabela 6.6 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 2)

CFD								Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso	
1	0,35	0,33	0,33	0,34	0,45	0,70	0,58	0,00	<u>5,92</u>	<u>0,667</u>	0,296	0,287
	0,55	0,45	0,49	0,54	0,57	0,70	0,45	0,00				
	0,78	0,72	0,74	0,78	0,70	0,62	0,28	0,00				
	0,64	0,40	0,39	0,43	0,41	0,61	0,37	0,00				
	0,50	0,36	0,36	0,35	0,30	0,47	0,37	0,00				
Média = 0,44												
2	0,48	0,44	0,42	0,36	0,29	0,66	0,56	0,00	6,01	0,644	0,295	0,289
	0,44	0,23	0,24	0,24	0,21	0,61	0,57	0,00				
	0,41	0,24	0,27	0,33	0,39	0,70	0,53	0,00				
	0,74	0,57	0,54	0,57	0,55	0,70	0,41	0,00				
	0,77	0,63	0,58	0,56	0,49	0,57	0,34	0,00				
Média = 0,42												
3	0,67	0,71	0,75	0,79	0,90	0,90	0,44	0,00	6,57	0,603	<u>0,307</u>	<u>0,307</u>
	0,65	0,57	0,57	0,57	0,54	0,53	0,35	0,00				
	0,33	0,19	0,18	0,14	0,09	0,26	0,43	0,00				
	0,38	0,19	0,18	0,14	0,09	0,37	0,39	0,00				
	0,43	0,36	0,38	0,34	0,28	0,44	0,33	0,00				
Média = 0,37												

Para o caso 3, conforme pode ser visto na Tabela 6.7, a aplicação dos métodos nas configurações típicas resultou em todos indicando a primeira configuração como sendo a mais adequada para este tipo de dormitório. Nesta configuração a janela fica posicionada no mesmo alinhamento do corredor formado pelas duas camas facilitando a passagem de ar pelo ambiente e evitando a geração de desconforto pelo excesso de fluxo de ar sobre as camas.

Tabela 6.7 – Resultados obtidos utilizando configurações típicas do banco de dados e os quatro métodos de seleção (caso 3)

	Configuração típica						Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso
1	0,23	0,30	0,29	0,37	0,43	0,57	<u>2,70</u>	<u>0,492</u>	<u>0,358</u>	<u>0,357</u>
	0,59	0,68	0,67	0,68	0,65	0,74				
	0,76	0,87	0,88	0,88	0,80	0,60				
	0,62	0,58	0,57	0,49	0,37	0,51				
	0,35	0,38	0,55	0,58	0,53	0,52				
	Média = 0,57									
2	0,41	0,39	0,38	0,34	0,37	0,58	5,02	0,445	0,290	0,294
	0,45	0,46	0,41	0,44	0,40	0,90				
	0,52	0,52	0,40	0,41	0,48	0,95				
	0,81	0,77	0,68	0,68	0,75	0,77				
	0,77	0,78	0,80	0,77	0,64	0,58				
	Média = 0,59									
3	0,68	0,71	0,72	0,71	0,68	0,65	6,05	0,361	0,294	0,312
	0,68	0,65	0,65	0,67	0,66	0,63				
	0,27	0,17	0,15	0,16	0,16	0,31				
	0,31	0,20	0,18	0,14	0,15	0,33				
	0,34	0,35	0,38	0,38	0,34	0,37				
	Média = 0,43									

Os resultados obtidos pelos métodos utilizando os dados de CFD na Tabela 6.8 mostram uma concordância unânime dos métodos para a primeira configuração.

Tabela 6.8 – Resultados da simulação utilizando CFD considerando a existência da mobília e os quatro métodos de seleção (caso 3)

	CFD						Mínimos Quadrados	Índice de Conformidade	Máxima Similaridade s/ peso	Máxima Similaridade c/ peso
1	0,19	0,21	0,24	0,26	0,37	0,53	<u>3,13</u>	<u>0,451</u>	<u>0,351</u>	<u>0,347</u>
	0,57	0,56	0,59	0,62	0,74	0,80				
	0,78	0,81	0,82	0,82	0,85	0,61				
	0,52	0,35	0,25	0,29	0,58	0,64				
	0,27	0,25	0,30	0,36	0,59	0,68				
	Média = 0,51									
2	0,31	0,26	0,26	0,28	0,46	0,61	4,79	0,424	0,301	0,306
	0,36	0,30	0,27	0,27	0,43	0,83				
	0,49	0,45	0,41	0,44	0,65	0,91				
	0,72	0,66	0,62	0,65	0,82	0,79				
	0,68	0,70	0,65	0,59	0,69	0,68				
	Média = 0,54									
3	0,60	0,61	0,61	0,61	0,63	0,63	6,50	0,326	0,298	0,316
	0,60	0,61	0,62	0,63	0,68	0,62				
	0,17	0,14	0,13	0,18	0,22	0,29				
	0,18	0,13	0,08	0,11	0,16	0,27				
	0,22	0,20	0,19	0,21	0,27	0,32				
	Média = 0,36									

Na Figura 6.4 resumem-se os resultados obtidos pela simulação dos três casos.

Figura 6.4 – Resumo dos resultados fornecidos pelos métodos de seleção

Observa-se que para o caso 1 os métodos forneceram resultados diferentes entre a configuração típica e o CFD, que considera a existência de mobília no ambiente, com exceção do método de máxima similaridade com peso, que indicou a terceira configuração para os dois testes.

No caso 2 os métodos da soma dos mínimos quadrados e índice de conformidade indicam diferentes resultados enquanto que os métodos de máxima similaridade com e sem peso indicam a mesma configuração.

No caso 3 verificou se uma escolha unânime entre os métodos para a configuração 1.

Destas observações, o método de máxima similaridade com peso se mostra mais coerente entre as respostas dadas entre a configuração típica e a simulação obtida por CFD e com isto é possível fazer uma verificação por meio das configurações típicas dos possíveis resultados em um ambiente mobiliado.

6.5.1 Análise da sensibilidade quanto aos requisitos

Tendo os índices de demanda e o resultado de simulação para uma configuração típica foram feitas avaliações com diferentes requisitos de modo a verificar a resposta do sistema de avaliação. Os resultados obtidos com o uso de método de máxima similaridade com peso são apresentados da Figura 6.5 a Figura 6.8.

0,34	0,54	1,04	0,75	0,61
0,35	0,52	1,00	0,71	0,63
0,37	0,51	0,96	0,76	0,65
0,42	0,53	0,91	0,74	0,67
0,56	0,58	0,87	0,74	0,69
0,62	0,77	0,70	0,64	0,65

Configuração típica

1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Demanda de ventilação

Figura 6.5 – Demanda de máxima ventilação, resultado do “matching” = 0,65

0,34	0,54	1,04	0,75	0,61
0,35	0,52	1,00	0,71	0,63
0,37	0,51	0,96	0,76	0,65
0,42	0,53	0,91	0,74	0,67
0,56	0,58	0,87	0,74	0,69
0,62	0,77	0,70	0,64	0,65

Configuração típica

0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Demanda de ventilação

Figura 6.6 – Demanda de ventilação por conforto, resultado do “matching” = 0,84

0,34	0,54	1,04	0,75	0,61
0,35	0,52	1,00	0,71	0,63
0,37	0,51	0,96	0,76	0,65
0,42	0,53	0,91	0,74	0,67
0,56	0,58	0,87	0,74	0,69
0,62	0,77	0,70	0,64	0,65

Configuração típica

0,2	0,2	1,0	0,2	0,2
0,2	0,2	1,0	0,2	0,2
0,2	0,2	1,0	0,2	0,2
0,2	0,2	1,0	0,2	0,2
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Demanda de ventilação

Figura 6.7 – Demanda de ventilação por conforto requisitando menor ventilação sobre das camas
resultado do “matching” = 0,80

0,34	0,54	1,04	0,75	0,61
0,35	0,52	1,00	0,71	0,63
0,37	0,51	0,96	0,76	0,65
0,42	0,53	0,91	0,74	0,67
0,56	0,58	0,87	0,74	0,69
0,62	0,77	0,70	0,64	0,65

Configuração típica

0,8	0,8	1,0	0,8	0,8
0,8	0,8	1,0	0,8	0,8
0,8	0,8	1,0	0,8	0,8
0,8	0,8	1,0	0,8	0,8
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Demanda de ventilação

Figura 6.8 – Demanda de ventilação por conforto requisitando maior ventilação sobre das camas
resultado do “matching” = 0,79

Com isto verifica-se que a mudança dos requisitos de demanda de ventilação altera o resultado do matching, mostrando a sensibilidade do método com relação a esta variável.

6.5.2 Exemplo de aplicação

Primeiramente escolhe-se o leiaute a ser estudado e com base nele se estabelece os requisitos de demanda de ventilação, Figura 6.9.

0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
0,5	0,5	1,0	0,5	0,5
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Figura 6.9 – Leiaute e requisitos do dormitório

Em seguida o sistema escolhe em seu banco de dados as configurações típicas com geometria semelhante a do leiaute, Figura 6.10.

Figura 6.10 – Configurações típicas de aberturas consideradas na análise

Depois de selecionadas as configurações geometricamente semelhantes, analisam-se as velocidades médias modulares confrontando-as com os requisitos de demanda de ventilação estabelecidos anteriormente.

0,34	0,54	1,04	0,75	0,61
0,35	0,52	1,00	0,71	0,63
0,37	0,51	0,96	0,76	0,65
0,42	0,53	0,91	0,74	0,67
0,56	0,58	0,87	0,74	0,69
0,62	0,77	0,70	0,64	0,65

matching=0,84

0,6	0,76	0,81	0,72	0,52
0,57	0,47	0,5	0,77	0,76
0,53	0,44	0,43	0,73	0,83
0,35	0,38	0,34	0,7	0,88
0,42	0,35	0,3	0,69	0,87
0,55	0,42	0,36	0,75	0,87

matching=0,79

Figura 6.11 – Velocidades médias modulares extraídas do banco de dados e os resultados do *matching*

Utilizando o método de máxima similaridade no confronto entre os requisitos e as velocidades médias modulares do banco de dados resulta na escolha da alternativa da esquerda.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um sistema numérico computacional para o estudo da ventilação em habitações baseado no método SOLA.

A validação do simulador foi realizada pela comparação com estudos numéricos e experimentais já publicados por outros autores. Mesmo utilizando um modelo de turbulência não tão sofisticado quanto o $k-\varepsilon$, $k-\omega$ ou LES, os resultados apresentaram uma boa concordância com os resultados publicados.

Uma limitação do simulador diz respeito à região muito próxima a superfície das paredes. Por não haver uma implementação de um modelo de turbulência para baixos números de Reynolds, o simulador não deve ser utilizado para analisar fluxos onde o foco de interesse são fenômenos que ocorrem na região da superfície da parede.

Outra limitação é quanto à região dos cantos externos de obstáculos, estes locais, por serem singularidades geométricas, são difíceis de serem simulados ou medidos experimentalmente. No simulador é aplicada uma condição de velocidade normal nula nas faces das células de canto do obstáculo e condição de superfície *no-slip* que apesar de não ser numericamente ideal este tratamento garante a velocidade normal nula na superfície dos obstáculos, condição esta que é imprescindível na simulação dos obstáculos.

Apesar destas limitações, os resultados da validação mostraram que os valores obtidos numericamente são satisfatórios e coerentes com as medições experimentais e resultados numéricos dos outros autores.

Por outro lado, utilizando seções bi-dimensionais para simplificar a análise do escoamento interno a um ambiente construído, foi possível obter um índice de ventilação que sintetiza os padrões de circulação de ar, refletindo de forma efetiva o desempenho do arranjo geométrico com relação ao requisito de ventilação. Sendo assim, é possível utilizar o índice como um parâmetro para a avaliação da ventilação e, conseqüentemente, do conforto térmico.

Da união dos desenvolvimentos na simulação e no estudo dos índices de ventilação foi proposta uma metodologia que pode facilitar o uso do CFD na avaliação de projetos ainda na fase de concepção bem como facilitar a interação entre engenheiros e arquitetos com a ferramenta computacional desenvolvida.

Esta metodologia baseia-se na confrontação do leiaute do ambiente com os padrões de circulação de ar definidos por configurações típicas de abertura. A confrontação foi testada com diversos modelos, partindo da simples soma dos mínimos quadrados até a utilização de métodos vindos da lógica nebulosa, sendo escolhido o critério de máxima semelhança na estrutura generalizada de Łukasiewicz, que demonstrou uma maior coerência entre as respostas obtidas, principalmente quando se utilizou pesos para diferir as seções com restrições de grande importância.

O método se mostrou bastante promissor quanto as análises feitas com os dormitórios, permitindo uma análise embasada em fenômeno físicos simulados sem a necessidade de aprofundamento nos conceitos do CFD e da simulação numérica.

Para os casos em que uma análise mais detalhada do fluxo de ar se faz necessária, o presente método fornece uma primeira aproximação da configuração que pode ser a ideal para a circulação de ar no ambiente, podendo também reduzir o número de simulações necessárias para se encontrar esta configuração.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, G.; RESTANO, C.; PRIMAVERA, L. Coherent structures of a flow around a surface-mounted cubic obstacle in turbulent channel flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, n.4, p.495-511, 2003.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2004**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2004a.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2004**: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Atlanta, 2004b.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 90.2-2007**: Energy-Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2007a.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007**: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, 2007b. Disponível em:
<<http://www.ashrae.org/technology/page/548>>. Acesso em: 26 mai. 2008

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2007**: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2007c. Disponível em:
<<http://www.ashrae.org/technology/page/548>>. Acesso em: 26 mai. 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. São Paulo, 2007a.

_____. **NBR 15.575-4**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. São Paulo, 2007b.

AYAD, S. S. Computational Study of Natural Ventilation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 82, n.1-3, p.49-68, 1999.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO. **Como Economizar US\$ 36 bilhões em eletricidade (sem desligar as luzes)**: Uma pesquisa sobre a produtividade energética nas Américas. São Paulo, 15 Set. 2008. Palestra proferida em função da Energy Efficiency and Competitiveness Conference, São Paulo, 2008. Disponível em <<http://www.iadb.org/secci/events2008.cfm>>. Acesso em: 20 set. 2008

BONNEFOY, X. Inadequate housing and health: an overview. **Int. J. Environment and Pollution**, v.30, p.411-429, 2007. Disponível em: <www.euro.who.int/Document/E90676.pdf>. Acesso em 12 mar. 2008

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, 18 de outubro de 2001.

BRASIL, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Resolução n. 176, 24 de outubro de 2000. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, 29 de outubro de 2000.

_____. Determina a publicação de Orientação Técnica elaborada por Grupo Técnico Assessor, sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Resolução n. 9, 16 de janeiro de 2003. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, 20 de janeiro de 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. Aprova Regulamento Técnico contendo medidas básicas referentes aos procedimentos de verificação visual do estado de limpeza, remoção de sujidades por métodos físicos e manutenção do estado de integridade e eficiência de todos os componentes dos sistemas de climatização, para garantir a Qualidade do Ar de Interiores e prevenção de riscos à saúde dos ocupantes de ambientes climatizados. Portaria n.3.523, 28 de agosto de 1998. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, 31 de agosto de 1998

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Brasília. Apresenta dados sobre o Balanço Energético Nacional. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432>. Acesso em: 09 Jul. 2006.

BRASIL. Comitê gestor do PAC. 1º Balanço do PAC: janeiro a abril de 2007. Brasília: 2007. 104 p. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/pac/>>. Acesso em 20 de Jul. 2007.

CASTRO, I.P.; ROBINS, A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. **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**, Lausanne, v. 28, n. 2, p. 137-144, 1998.

CHENG, L. Y. **Quantificação de variáveis subjetivas no projeto**: apostila da disciplina PCC-5015. 2007.

ELETROBRÁS. PROCEL-EDIFICA. **Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Santa Catarina: LabEEE-UFSC, 2007. 50 p. Disponível em <<http://www.labee.ufsc.br/eletrobras/reg.etiquetagem.voluntaria.html>>. Acesso em 05 Mar 2008

_____. **Subsídio à Regulamentação**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?View={964B4615-7B30-47CA-85BB-0FC667069A55}>>. Acesso em 10 Ago 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Setor comercial lidera crescimento do consumo de energia. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**, n. 3, ano 1, dez. de 2007. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Forms/EPEResenhaMensal.aspx>>. Acesso em: 13 fev. 2008.

_____. Crescimento de 5,4% em 2007 é o maior desde o racionamento. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**, n. 4, ano 1, jan. de 2008a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Forms/EPEResenhaMensal.aspx>>. Acesso em: 13 fev. 2008.

_____. Verão ameno no Sul-Sudeste segura crescimento da demanda em março. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**, n. 7, ano 1, abr. de 2008b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Forms/EPEResenhaMensal.aspx>>. Acesso em: 31 jul. 2008.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Indoor Air Facts no.4: Sick Building Syndrome**. Fev. 1991. Disponível em <<http://www.epa.gov/iaq/pubs/index.html>>. Acesso em 18 jun. 2008

EVOLA, G; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and buildings**, v. 38, n. 5, p. 491-501, 2006.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering**. McGraw-Hill, New York, 1972.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos** : 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.

INMETRO. **Qualidade do Ar em Estabelecimentos de Uso Público e Coletivo.** Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/qualidadedoAr.asp>>. Acesso em: 24 Out. 2007

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa de Orçamentos Familiares - POF 2002-2003. Rio de Janeiro : IBGE, 2006. 140p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2002/default.tab.shtm>>. Acesso em: 13 fev. 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730: Moderate thermal environments – Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.** Geneva, 1984.

JIANG, Y. et al. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, n. 3, p.331-353, 2003.

LUUKKA, P.; SAASTAMOINEN, K.; KÖNÖNEN, V. A Classifier Based on the Maximal Fuzzy Similarity in the Generalized Łukasiewicz-Structure. In: The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2001, Melbourne, Australia. **Proceedings...** Melbourne: IEEE, 2001. p. 195-198. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1007281>. Acesso em 17 Dez 2008.

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. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/m_bs2007.asp>. Acesso em 10 Jun 2008.

MOTZUKI, F. K.; CHENG, L. Y. Estudo e análise da ventilação de projetos de habitações utilizando sistemas computacionais. In: XII Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.

MOTZUKI, F. K.; CHENG, L. Y.; PIPINEL, E. A. R. Análise computacional da influência das aberturas na ventilação cruzada. In: VIII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p. 1280-1289. 1 CD-ROM.

MUNDT, E. (Ed.), MATHISEN, H. M., NIELSEN, P. V., MOSER, A. **Ventilation Effectiveness**: REHVA Guidebook nº2. 2004.74 p.

SÃO PAULO (município). Dispõe sobre as regras gerais e específicas a serem obedecidas no projeto, licenciamento, execução, manutenção e utilização de obras e edificações, dentro dos limites dos imóveis revoga a Lei nº 8.266, de 20 de junho de 1975, com as alterações adotadas por leis posteriores, e dá outras providências. Lei nº 11.228, de 25 de junho de 1992. **Diário Oficial do Município de São Paulo**, 26 de junho de 1992. Disponível em http://plantasonline.prefeitura.sp.gov.br/legislacao/lei_int.php?id=1040. Acesso em 19 jun. 2008.

SOUSA, J. M. M. Turbulent Flow around a surface-mounted obstacle using 2D-3C DPIV. **Experiments in fluids**, v. 33, p.854-862, 2002.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge, Massachussets : MIT Press, 1972. 300 p.

THOMAS, T. G.; WILLIAMS, J. J. R. Simulations of a skewed turbulent flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 81, n. 1-3, p.347-360, 1999.

UN-HABITAT. The Habitat Agenda Goals and Principles, Commitments and the Global Plan of Action. 2ª Conferência HABITAT, Istambul, 1996. Disponível em: http://www.unhabitat.org/downloads/docs/1176_6455_The_Habitat_Agenda.pdf. Acesso em 18 mar. 2008

WILCOX, D.C. **Turbulence modeling for CFD**. La Cãnada, California: DCW Industries, 2004. 537 p.

YAMAMOTO, M. A. **Uma proposta para disponibilizar sistemas de simulação pela internet**. 2005. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ZADEH, L. A. Similarity Relations and Fuzzy Orderings. **Information Sciences**, v. 3, n. 2, 1971. p. 177-200

BIBLIOGRAFIA

BRADSHAW, P.; CEBECI, T.; WHITELAW, J. H. **Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow**. New York: Academic Press, 1981.

COLLS, J. **Air Pollution**: An introduction. 2ª ed. London and New York: Spon Press, Taylor & Francis group, 2002. Cap. 8.

DAVIDSON, L. **An introduction to Turbulence Models**. Göteborg, Sweden: Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, 2003. Disponível em <www.tfd.chalmers.se/~lada>

FLETCHER, C. A. J. **Computational Fluid Techniques for Fluid Dynamics 1: Fundamental and General Techniques**. 2ª ed. Berlin; New York : Springer-Verlag, 1991.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1981. 562p.

GIVONI, B. **Man, Climate and architecture**. 2ª ed. London: Applied Science Publishers, 1976.

_____. **Passive low-energy cooling of buildings**. New York: John Wiley, 1994.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Indoor air pollutants: exposure and health effects. EURO Reports and Studies, Copenhagen, n. 78, 1982. Disponível em <<http://libdoc.who.int/euro/r&s/>>. Acesso em 23/01/2009.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

VERSTEEG, .H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. Harlow, Essex, England; Longman Scientific & Technical, 1995. 257p.