



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

ESTUDO DA AÇÃO E EFEITOS DO VENTO EM MODELOS DE
EDIFICAÇÕES ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO VENTO
COMPUTACIONAL

Caruaru, 2016

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA AÇÃO E EFEITOS DO VENTO EM MODELOS DE EDIFICAÇÕES
ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO VENTO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco -
UFPE, como requisito para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Fenômenos dos
Transportes

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Bono

Caruaru, 2016

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4 - 1242

N244e Nascimento, Anderson Viana do.
Estudo da ação e efeitos do vento em modelos de edificações através da engenharia do vento computacional. / Anderson Viana do Nascimento. – 2016.
57f. il. ; 30 cm.

Orientador: Gustavo Bono
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências.

1. Ventilação natural. 2. Métodos de elementos finitos. 3. Engenharia Civil. I. Bono, Gustavo (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2016-385)

ANDERSON VIANA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA AÇÃO E EFEITOS DO VENTO EM MODELOS DE EDIFICAÇÕES
ATRAVÉS DA ENGENHARIA DO VENTO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco -
UFPE, como requisito para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Fenômenos dos
Transportes

A banca composta pelos professores abaixo, considera O ALUNO ANDERSON
VIANA DO NASCIMENTO APROVADO COM NOTA _____.

Caruaru, 14 de dezembro de 2016.

Prof. Dr. Gustavo Bono _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Cléssio Leão Silva Lima _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Dedico este trabalho ao meu querido avô Santino Pereira Viana, que sempre torceu muito por mim, mas infelizmente não pode compartilhar de minha alegria neste momento.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo Bono, pelos quase quatro anos de muito apoio, incentivo e inúmeros conselhos.

Aos meus pais, Adilson Félix do Nascimento e Roseneide Viana do Nascimento, pelo apoio, incentivo e confiança em toda minha vida.

À minha incrível avó Maria do Carmo Viana, pela ajuda, apoio e incentivo.

Ao meu falecido avô Santino Viana, por sempre acreditar em mim.

RESUMO

Amenizar a temperatura no interior das edificações é de extrema importância num país tropical como o Brasil. Para isto, a ventilação natural constitui o meio passivo mais eficiente para obtenção do conforto térmico. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo investigar como a aerodinâmica das construções influencia a ventilação natural em modelos simplificados de edificações através de ferramentas numéricas baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional. O programa HEXAFEM_3D_IFF, que faz uso do Método dos Elementos Finitos, resolve as equações de Navier-Stokes para um escoamento incompressível, 3D e turbulento. Foram realizadas simulações em diferentes modelos de edificações, compreendendo geometrias com teto plano, totalmente fechadas e com aberturas, e geometrias com teto duas águas de diferentes inclinações do telhado. Os resultados obtidos permitem capturar eficientemente as principais características do escoamento, tais como: formação de vórtices e variações das distribuições de pressão e velocidade. São realizadas validações do método utilizado, através da comparação dos resultados calculados com resultados de outros autores. Ainda, é realizada uma comparação entre os resultados dos diferentes telhados de duas águas e outra entre as edificações com aberturas. Após a análise destes resultados, constatou-se a eficiência e o potencial da Engenharia do Vento Computacional no estudo dos parâmetros geométricos das edificações que podem influenciar a ventilação natural. Também, verificou-se uma melhora das condições de ventilação natural para telhados mais inclinados e a importância da ventilação cruzada.

Palavras-chave: Engenharia do Vento Computacional. Ventilação Natural. Simulação Numérica. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Softening the temperature inside of buildings is extremely important in a tropical country like Brazil. For this, natural ventilation is the most efficient passive means to obtain thermal comfort. Therefore, the present work aims to investigate how the aerodynamics of buildings influence natural ventilation in simplified models of buildings through numerical tools based on Computational Fluid Dynamics (CFD). The HEXAFEM_3D_IFF program, which makes use of the Finite Element Method (FEM), solves the Navier-Stokes equations for an incompressible flow, 3D and turbulent. Simulations were performed in different models of buildings, comprising geometries with ceiling plan, fully closed and with openings, and gable roof geometries of different inclinations of the roof. The results obtained allow to efficiently capture the main characteristics of the flow, such as: formation of vortices, variations of pressure and velocity distributions. Validations of the method are performed, comparing the results calculated with results of other authors. Also, a comparison is made between the results of the different gable roof and another between the buildings with openings. After analyzing these results, we verified the efficiency and potential of Computational Wind Engineering in the study of the geometric parameters of buildings that can influence natural ventilation. Also, it was found an improvement of the natural ventilation conditions for steeper slopes and the importance of cross ventilation.

Keywords: Computational Wind Engineering. Natural Ventilation. Numerical Simulation. Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico Rosa dos Ventos para a cidade de Caruaru-PE.....	16
Figura 2 - Fluxo de ar por ação do vento atuante sobre a edificação.....	17
Figura 3 - Tipos de mecanismo de ventilação natural.....	17
Figura 4 - Representação esquemática do escoamento entorno de um modelo simplificado.	19
Figura 5 - Faces pentagonais dos casos de teto duas águas.	30
Figura 6 - Domínio computacional do primeiro modelo.....	31
Figura 7 - Modelos dos casos abertos.....	32
Figura 8 - Domínio computacional do modelo aberto.....	33
Figura 9 - Malhas computacionais para os casos de teto plano.	34
Figura 10 - Distribuição de pressão média nos casos de teto plano.	35
Figura 11 - Iso-superfícies de sucção.	36
Figura 12 - Comparação dos coeficientes de pressão para o caso do cubo.....	37
Figura 13 - Distribuição dos coeficientes de pressão.....	38
Figura 14 - Distribuição dos coeficientes de pressão. Dados experimentais.	38
Figura 15 - Malhas nos casos da edificação com teto duas águas.	40
Figura 16 - Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque do vento nulo. ..	41
Figura 17 - Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque do vento de 90°.	41
Figura 18 - Distribuição de pressão para o caso da edificação com teto duas águas.	42
Figura 19 - Diferenças de pressão entre as faces de barlavento e sotavento.....	43
Figura 20 - Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso de 45° lateral.	44
Figura 21 - Distribuição dos coeficientes de pressão, caso de 45° e $\theta = 90^\circ$. Dados experimentais.	44
Figura 22 - Posição dos perfis de velocidade, caso de Tominaga.....	45
Figura 23 - Perfis de velocidade para o caso de duas águas, parte 1.	45
Figura 24 - Perfis de velocidade para o caso de duas águas, parte 2.	46
Figura 25 - Malhas para o caso da edificação com aberturas.....	47
Figura 26 - Distribuição de pressão para o caso de abertura única.	47
Figura 27 - Distribuição de pressão para o caso de dupla abertura.	48

Figura 28 - Linhas de corrente em plano e velocidade em x no interior dos casos vazados.....	48
Figura 29 - Linhas de corrente e velocidade em x para o caso de abertura única. ...	49
Figura 30 - Linhas de corrente e velocidade em x para o caso de abertura dupla. ..	49
Figura 31 - Posição dos perfis de velocidade, caso de Jiang <i>et al.</i> (2003).....	50
Figura 32 - Comparação dos perfis de velocidade do caso de abertura única, parte 1.	50
Figura 33 - Comparação dos perfis de velocidade do caso de abertura única, parte 2.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de contorno dos modelos apresentados	31
Tabela 2 - Principais parametros das malhas no caso do exemplo de teto plano	34
Tabela 3 - Dados das malhas para a edificação com telhado de duas águas	39

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO/ REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1	Ventilação natural.....	15
3.2	Aspectos físicos do estudo da ventilação	17
3.3	Dinâmica do Fluidos Computacional (CFD).....	20
3.4	Simulação da turbulência e programa HEXAFEM	21
3.4.1	Modelos de turbulência.....	21
3.4.2	Formulação matemática do problema.....	22
3.4.3	Hipótese de pseudo-compressibilidade	24
3.4.4	Formulação numérica.....	25
3.5	Pesquisas em ventilação	26
4	METODOLOGIA.....	29
4.1	Características gerais.....	29
4.2	Modelos de edificações com teto duas águas	30
4.3	Modelo de edificações com aberturas	32
5	RESULTADOS	34
5.1	Modelo de edificação com teto plano	34
5.2	Modelos de edificações com teto duas águas	39
5.3	Modelos de edificações com aberturas	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
6.1	Conclusões da Pesquisa	52
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a concentração da população nas cidades cresce cada dia mais, com isso, cria-se uma grande necessidade de avaliar as condições do meio para buscar-se reforçar as características do desenho das edificações que proporcionem melhor ventilação, tanto nos espaços internos como nos externos.

A ventilação nas edificações tem por objetivo principal criar um ambiente interno confortável e saudável, preservando a qualidade do ar interior. Projetos que não levam em consideração a ventilação do ambiente interno podem causar aos ocupantes, além de um desconforto térmico, problemas crônicos, como alergias, asma, problemas de pele, etc.

Uma parte significativa do uso de energia em edificações está associada ao condicionamento de ar e à iluminação. A construção de edificações adequadas ao clima local pode resultar num consumo de energia substancialmente menor. Cabe salientar que é na fase de projeto da edificação onde são tomadas as decisões mais importantes associadas ao consumo futuro de energia. A elaboração de projetos que considerem adequadamente o clima da região na qual a edificação está inserida resulta na melhoria da eficiência energética da mesma (LÔBO & BITTENCOURT, 2003).

Sendo assim, a ventilação natural se constitui no principal recurso passivo para obtenção do conforto térmico, além de promover a redução do consumo energético com condicionamento artificial (ventilação mecânica e ar condicionado).

Em diversas cidades brasileiras são construídas casas populares unifamiliares através do Programa Minha Casa Minha Vida, que, graças ao custo reduzido que estas residências possuem e às formas de pagamento a longo prazo, tornou-se o maior programa de habitação do Brasil. Logo, é de grande importância que modelos de casas adotadas nesse programa sejam idealizadas de forma a prover uma eficiente ventilação natural.

Apesar de toda a importância da ventilação natural, existem restrições ao seu uso por parte dos arquitetos e engenheiros por não haver garantias de que ela possa resolver os problemas de conforto térmico, quando comparada aos sistemas artificiais. Nesse sentido, decidiu-se investigar formas de avaliar o comportamento da ventilação natural através de ferramentas de simulação computacional, visando auxiliar na tomada de decisão durante a etapa de projeto.

Os programas de simulação numérica baseados na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês *Computational Fluid Dynamics*) são ferramentas fundamentais para o estudo da aerodinâmica e ventilação natural em edificações. A simulação de ventilação permite mostrar o desempenho da edificação mesmo antes de ser construída. Sendo assim, a simulação é uma ferramenta de auxílio e suporte na tomada de decisões desde o momento em que as ideias estão sendo amadurecidas. Portanto, a utilização da CFD torna-se importante nos primeiros estágios de projeto, ou seja, na fase de concepção do edifício. Mesmo em edificações já construídas, é possível estudar e propor modificações arquitetônicas a fim de reduzir o consumo de energia através da ventilação natural.

A rapidez na criação dos modelos computacionais e a possibilidade de realizar estudos de diversas características geométricas do contorno sólido, fazem das simulações computacionais um instrumento ainda mais interessante. A rápida visualização dos resultados permite que novas alterações sejam realizadas em curto prazo de tempo. Isso torna a simulação numérica uma opção mais econômica e com tempo de execução menor se comparada com as simulações e estudos realizados em túneis de vento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar, através da CFD, a aerodinâmica de modelos de residências, observando como suas características geométricas podem afetar a ventilação natural, tanto em seu interior quanto em seu exterior.

2.2 Objetivos específicos

- a) Simular o escoamento ao redor de um modelo cúbico de edificação, a fim de calcular a distribuição dos coeficientes de pressão e analisar os principais fenômenos físicos;
- b) Simular o escoamento ao redor de modelos de moradias com telhado de duas águas, onde variam-se a posição da edificação e o ângulo de inclinação do telhado, com o intuito de analisar como os parâmetros geométricos influenciam a ventilação natural no exterior da edificação;
- c) Simular o escoamento no interior e exterior de modelos de edificações com uma e duas aberturas, a fim de estudar a influência da ventilação cruzada sobre a ventilação natural.

3 REFERENCIAL TEÓRICO/ REVISÃO DA LITERATURA

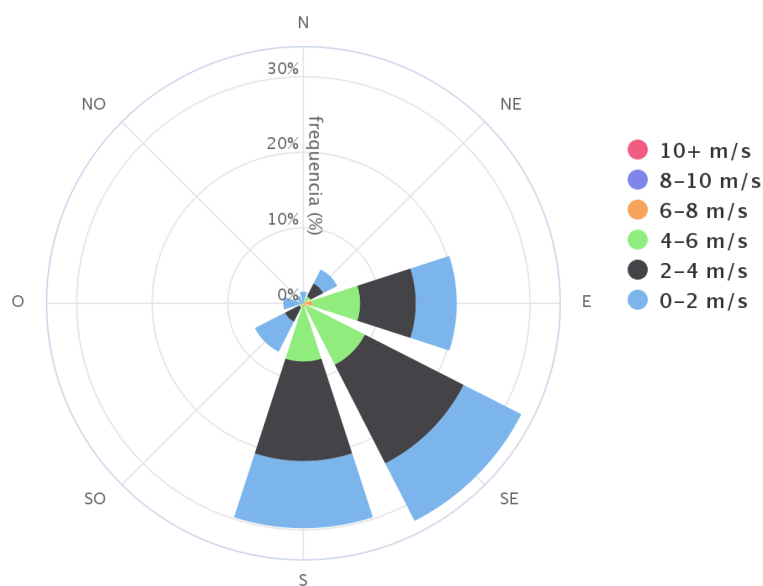
3.1 Ventilação natural

De acordo com Bittencourt & Cândido (2010), a ventilação no interior das edificações pode ser produzida por meios mecânicos, também conhecida como ventilação mecânica; e por meios naturais, sendo denominada ventilação natural. Em regiões de clima quente, tais mecanismos podem garantir o conforto térmico no interior das edificações (ALLARD, 1998).

Rupp & Ghisi (2013) lembram ainda que há o uso de equipamentos de refrigeração, como ar-condicionado, para obter-se o conforto térmico no interior dos edifícios. Tais aparelhos são responsáveis por considerável parcela do consumo de energia elétrica nos centros urbanos. Estima-se que o consumo dos sistemas de refrigeração e ar-condicionado é aproximadamente 15% da eletricidade utilizada em todo o mundo. Existem também outros problemas associados ao uso destes sistemas, como o caso dos problemas ambientais, decorrentes das emissões dos gases de refrigeração usados nas instalações de ar condicionado, que afetam de forma significativa a camada de ozônio e contribuem para o aquecimento global (GHIAUS & ALLARD, 2004).

Para evitar os problemas relacionados ao uso de sistemas de refrigeração e ar-condicionado, o uso da ventilação natural é uma ótima solução. A Norma NBR 15220 (ABNT, 2005), que apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, indica a ventilação natural como estratégia de condicionamento térmico passivo em 7 das 8 zonas nas quais o país foi subdividido. As recomendações para a ventilação natural, de acordo com as zonas, variam entre ventilação permanente (durante todo o ano ou no verão) e ventilação seletiva (nos períodos quentes, quando a temperatura exterior for menor que a interior). Em Caruaru, a ventilação natural pode ser utilizada para garantir o conforto térmico no interior das edificações em 43,37% das horas do ano, graças aos ventos que atuam predominantemente nas direções sul e sudeste, como pode ser visto na Figura 1 (PROJETEEE, 2016).

Figura 1 - Gráfico Rosa dos Ventos para a cidade de Caruaru-PE.



Fonte: Projeteee (2016).

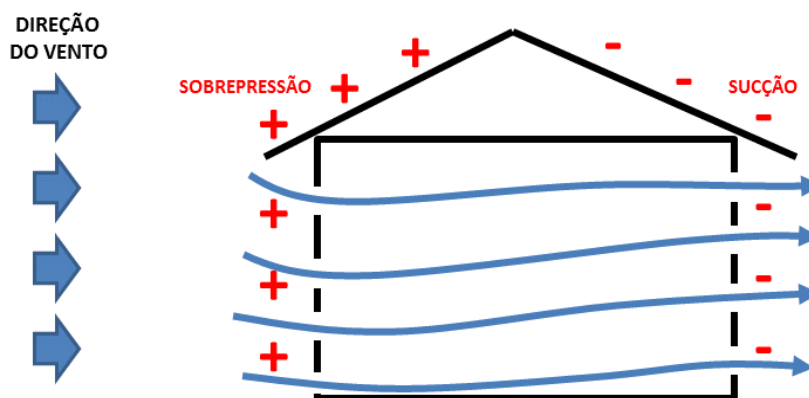
É válido lembrar a importância da ventilação natural também por razões de salubridade dos ambientes e de seus ocupantes, pois permite uma renovação contínua do ar interno de um recinto. Bower (1995) destaca que a ventilação garante aos usuários um ar confortável e saudável, além de poder ser utilizada para diluir os poluentes.

Quanto à natureza da ventilação natural, seus principais mecanismos são a diferença de pressão causada pela ação do vento nas superfícies da edificação e a diferença de temperatura (efeito chaminé), que gera um diferencial de energia que tende a ser minimizado (SOUZA & RODRIGUES, 2012). A Figura 2, mostra esquematicamente como a diferença de pressões promove a ventilação interna da edificação, onde o sentido de deslocamento do vento se dá da região de maior pressão para a região de menor pressão.

Segundo Allocca, Chen & Glicksman (2003), o mecanismo de ventilação natural pode ser dividido em dois tipos distintos, a ventilação cruzada, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas em lados opostos de um ambiente, e a ventilação unilateral, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas no mesmo lado de um ambiente. Na Figura 3, mostram-se os dois tipos de ventilação natural. A disposição conveniente de aberturas em paredes opostas (lado do barlavento, que é a área virada ao vento, e do sotavento, que é a área do lado oposto

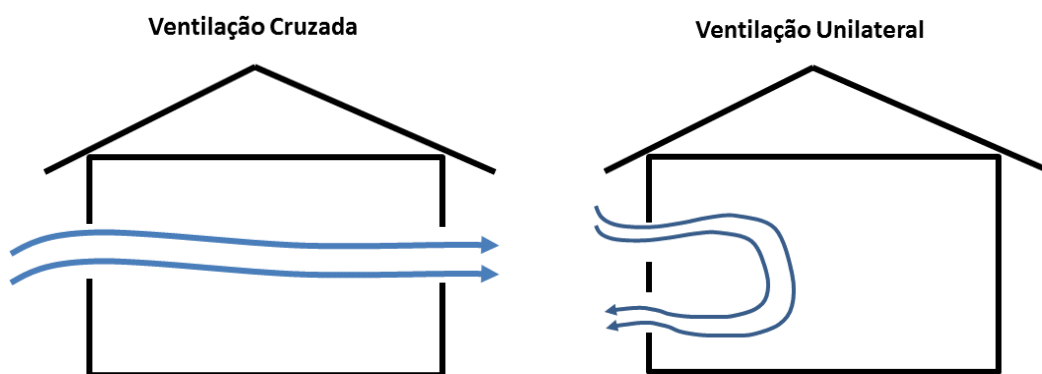
ao vento) e na direção dos ventos dominantes é fundamental para favorecer o uso da ventilação natural e maximizar o fluxo de ar na ventilação cruzada.

Figura 2 - Fluxo de ar por ação do vento atuante sobre a edificação



Fonte: Autor (2016).

Figura 3 - Tipos de mecanismo de ventilação natural.



Fonte: Autor (2016).

3.2 Aspectos físicos do estudo da ventilação

Ao escoar naturalmente, o vento sofre uma ação tangencial, em sentido contrário ao seu, causada pela rugosidade (presença de saliências e reentrâncias) do solo, criando uma deformação no perfil de velocidade do vento. Dada uma determinada altura, nomeada camada limite, as massas de vento passam a não sentir as ações do solo e a velocidade do vento torna-se quase constante. Para simular os efeitos do solo sobre o vento, Tominaga *et al.* (2008) indicam como a mais simples

solução, utilizar a lei da potência para definição do perfil vertical de velocidade. A lei da potência é definida pela equação 1:

$$V(z) = V_0 \left(\frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (1)$$

Onde:

z = altura das massas de ar em relação ao solo, em metros;

$V(z)$ = velocidade do vento em função da altura, em metros por segundo;

V_0 = velocidade de entrada ou de referência, em metros por segundo;

δ = altura da camada limite do vento, em metros;

α = expoente da lei da potência.

Outro aspecto físico importante é a forma (ordenadamente ou aleatoriamente) com que as partículas de ar se movimentam. De acordo com Brunetti (2008), o grau de aleatoriedade macroscópica do movimento das partículas pode ser calculado de acordo com a equação 2:

$$Re = \frac{V D}{\nu} \quad (2)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

V = velocidade do fluido;

D = longitude característica do fluido, para o caso de estudo de ventilação, é a dimensão característica do contorno sólido (menor aresta);

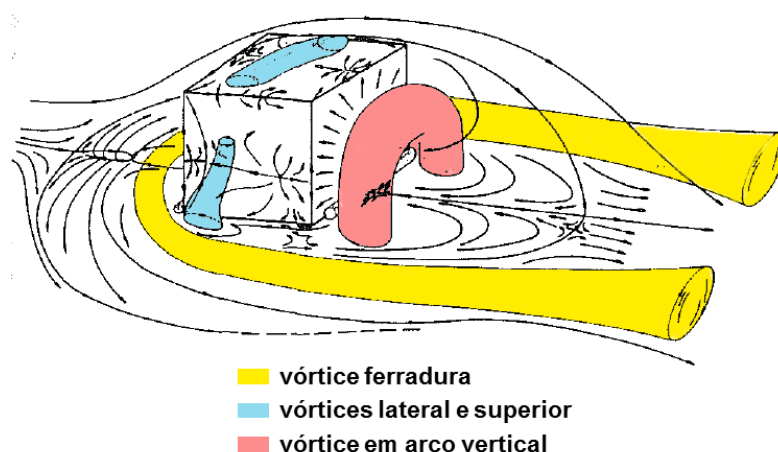
ν = viscosidade cinemática do fluido (relação entre resistência que o fluido apresenta ao escoamento e sua densidade);

Quando o número de Reynolds em escoamentos internos hidrodinamicamente desenvolvidos é superior a 2400, as partículas possuem significativa desordem de movimento, nestas condições o escoamento é denominado turbulento. Quanto maior a turbulência do escoamento, maiores são as chances de ocorrência do fenômeno físico chamado de vórtice, que trata-se de um redemoinho de vento.

No estudo experimental em túnel de vento de Martinuzzi & Tropea (1993), mostra-se claramente a topologia do escoamento e a presença dos vórtices ao redor

de um modelo cúbico. No estudo foi adotado um número de Reynolds de aproximadamente 10^5 . Na Figura 4, mostra-se uma adaptação baseada nos resultados obtidos por Martinuzzi & Tropea (1993), que apresenta os principais vórtices envolvidos no escoamento em torno do modelo. Percebe-se claramente a natureza complexa do escoamento, apesar da geometria simples.

Figura 4 - Representação esquemática do escoamento entorno de um modelo simplificado.



Fonte: Autor (2016), Martinuzzi & Tropea (1993).

As massas de ar que escoam ao redor de um contorno sólido sofrem bruscas mudanças de direção, causadas pelas formas geométricas do contorno, graças a isso surgem os fenômenos físicos característicos e grandes variações de pressão do ar. Na região de barlavento há a colisão das partículas de ar contra a face frontal do contorno, isso ocasiona as sobrepressões, ou seja, pressões positivas. Já na região lateral e na região de sotavento, há uma menor densidade de partículas do ar, ocasionada pelo desvio que o vento sofre ao encontrar o contorno, e com isto surgem as sucções, ou seja, pressões negativas.

Nota-se, também, que o escoamento se separa na frente do cubo, com isso aparecem vórtices que pode assumir variados tamanhos, tais vórtices são chamados de vórtices de base. O principal vórtice de base, que se inicia na frente e se estende até a região posterior, é chamado de vórtice base ou ferradura, devido ao formato que assume. Outras regiões de separação aparecem nas faces laterais e superior do contorno, formando vórtices nessas regiões.

Devido à sucção presente atrás da edificação, forma-se uma grande região de separação, que interage com o vórtice ferradura criando a região de esteira. Ainda

nessa região, aparece um vórtice imediatamente após o obstáculo, que toma o formato de arco vertical.

3.3 Dinâmica do Fluidos Computacional (CFD)

A ventilação natural de uma edificação pode ser estimada por diferentes ferramentas de predição. Dentre as mais recorrentes na bibliografia, destacam-se cinco ferramentas, são elas: os modelos algébricos, os modelos empíricos, as medições *in loco*, experimentos em escala reduzida e as simulações em CFD. Os modelos algébricos possuem grande embasamento teórico do fenômeno físico, porém tendem a apresentar grau de incerteza elevado, principalmente em casos mais complexos. Os modelos empíricos são adaptações dos modelos algébricos, onde se realizam experimentos, medições ou simulações a fim de melhorar a precisão dos modelos, porém o método torna-se bastante limitado.

As medições *in loco* são bastante precisas, já que trabalham em situação real, entretanto apresentam custos elevados e não permitem a manipulação das condições de escoamento. Já os experimentos em escala reduzida permitem a manipulação das condições de escoamento, contudo ainda apresentam o problema de custo. Por fim, a CFD permite realizar simulações numericamente, de forma a ter total controle sobre as condições de escoamento e possibilidade de simulações complexas, tudo isso com custo reduzido (ARAÚJO & CUNHA, 2010).

Bournet & Boulard (2010) comentam que com o recente desenvolvimento da CFD há a possibilidade de estudar-se os efeitos de ventilação sob variadas configurações geométricas e climáticas. Atualmente esta abordagem é amplamente conhecida e aplicada em diversos campos da engenharia, pois a disposição de poderosos computadores proporciona praticidade e precisão nas simulações numéricas. Portanto a CFD mostra-se uma ferramenta bastante eficiente para o estudo da aerodinâmica e ventilação natural de edificações.

A CFD trata, principalmente, de resolver as Equações de Navier-Stokes, que são equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento do fluido (SOUZA, 2013). Diversos trabalho, como os realizados por Braun & Awruch (2009), Bono & Awruch (2007), e Bono & Bono (2014) demonstram que o método dos elementos finitos (FEM do inglês Finite Element Method) apresenta ótimos resultados na resolução das equações diferenciais parciais em domínios complexos. Um bom refinamento da

malha e a distribuição conveniente dos elementos favorecem a minimização de erros. Tominaga *et al.* (2008) e Franke *et al.* (2007) apresentam algumas recomendações que precisam ser seguidas na solução de problemas da Engenharia do Vento Computacional. Quando à escolha das dimensões do domínio computacional (espaço simulado), são fornecidas medidas mínimas para evitar-se erros desnecessários. Ressalta-se a importância do tempo de convergência na simulação, que deve ser avaliado e respeitado para evitar-se resultados errôneos, e por fim, os é recomendado validar o programa utilizado através da comparação de resultados com outros autores, de preferência com resultados experimentais, utilizando resultados que permitam uma perfeita comparação.

3.4 Simulação da turbulência e programa HEXAFEM

3.4.1 Modelos de turbulência

Graças ao crescente aumento nas capacidades computacionais (memórias e velocidade de processamento) e desenvolvimento de algoritmos numéricos, tornou-se possível a resolução das equações de Navier-Stokes sobre configurações tridimensionais. Esta evolução foi acompanhada pelo desenvolvimento de novos modelos de turbulência (TULAPURKARA, 1997) para o fechamento das equações médias espaciais e temporais de Navier-Stokes (RANS do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*). A Simulação de Grandes Escalas (LES do inglês *Large Eddy Simulation*) e a Simulação Numérica Direta (DNS do inglês *Direct Numerical Simulation*) representam os futuros desafios na simulação de escoamentos turbulentos.

A metodologia LES, inicialmente proposta por Smagorinsky, consiste em resolver diretamente as maiores estruturas turbulentas, que contêm a maior parte de energia, e modelar apenas as menores estruturas. A metodologia LES baseia-se na premissa de que os movimentos nas menores escalas tendem a ser mais homogêneos e isotrópicos, sendo, por consequência, menos afetados pelas condições de contorno. Dessa forma, a modelagem das menores escalas tem um caráter universal, ou seja, uma menor dependência do tipo de escoamento utilizado (SMAGORINSKY, 1963). Em contraste, a metodologia DNS trata de capturar todas as escalas de estruturas turbulentas.

A principal diferença entre as metodologias DNS e LES está no conceito de filtragem, pela qual se obtém a separação de escalas. Uma variável submetida à filtragem será composta de duas partes: a filtrada, referente às grandes escalas, resolvida diretamente durante a simulação e a denominada sub-malha, não resolvida pela malha, que necessita ser modelada. No processo de filtragem das equações de Navier-Stokes surgem termos não lineares, que contêm grandezas para as quais não há equações explícitas e que necessitam ser modelados.

A mais popular aproximação empregada como modelo sub-malha da metodologia LES tem sido o modelo proposto por Smagorinsky. Neste modelo as tensões de Reynolds sub-malha são aproximadas na forma de um processo de difusão por gradiente, fazendo analogia ao movimento molecular. Através do conceito de viscosidade turbulenta introduzida na hipótese de Boussinesq pode-se realizar o fechamento das equações de Navier-Stokes filtradas. A representação da turbulência, nesse modelo, é feita por uma viscosidade turbulenta como uma propriedade local do fluido (pode variar no tempo e no espaço), quando, na realidade, a viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento (BONO, LYRA & BONO, 2011).

3.4.2 Formulação matemática do problema

São adotadas as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento para descrição do escoamento em meio contínuo, tridimensional, isotérmico, turbulento e em regime transiente. Desprezando as forças de volume e a existência de sumidouro, as equações que governam o problema podem ser escritas de acordo com as equações 3 e 4:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{em } \Omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{em } \Omega \quad (4)$$

Onde:

$i, j = 1, 2, 3$ (dimensões espaciais);

$\Omega \subset \mathbb{R}^N$;

Γ denota o contorno de Ω ;

x = coordenada espacial;

t = coordenada temporal;

v_i = componente de velocidade na direção da coordenada x_i ;

ρ = massa específica;

p = pressão;

τ_{ij} = componentes do tensor de tensões viscosas;

δ_{ij} = delta de Kronecker.

Considerando as hipóteses de Stokes, a equação constitutiva é definida de acordo com a equação 5:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_h}{\partial x_h} \delta_{ij} \right) \quad (5)$$

Onde:

μ = viscosidade dinâmica do fluido (resistência que o fluido apresenta ao escoamento);

Para definir totalmente o problema, é necessária a adição ao sistema de equações, dado pelas equações 3 e 4, as condições iniciais e de contorno para as variáveis. As condições iniciais, em $t = t^0$, são definidas de acordo com as equações 6 e 7:

$$v_i = v_i^0 \quad (6)$$

$$p_i = p_i^0 \quad (7)$$

As condições de contorno essenciais (condições de Dirichlet) são dadas pelas equações 8 e 9:

$$v_i = \bar{v}_i \text{ em } \Gamma_v \quad (8)$$

$$p = \bar{p} \text{ em } \Gamma_p \quad (9)$$

Onde:

$\bar{v}_i$ = valor prescrito da variável v_i na parte Γ_v do contorno Γ ;

$\bar{p}$ = valor prescrito da variável p na parte Γ_p do contorno Γ ;

As condições de contorno naturais (condições de Neumann) são dadas pela equação 10:

$$(-p\delta_{ij} + \tau_{ij})n_j = \hat{t}_i \text{ em } \Gamma_\sigma \quad (10)$$

Onde:

n_j = cossenos diretores da normal externa num ponto de Γ_σ com o eixo x_j ;

$\hat{t}_i$ = é a componente de uma força de superfícies na direção do x_i atuando na parte Γ_σ do contorno.

3.4.3 Hipótese de pseudo-compressibilidade

As equações que modelam o escoamento transiente incompressível viscoso numa descrição euleriana em coordenadas cartesianas podem ser escritas considerando a hipótese da pseudo-compressibilidade (KAWAHARA & HIRANO, 1983). Esta hipótese modifica a equação de conservação de massa possibilitando escrevê-la em função da derivada temporal da pressão. Esta abordagem é semelhante à hipótese de compressibilidade artificial introduzida por Chorin (1967), consistindo em admitir que as variações de massa específica são desprezíveis e a velocidade de propagação do som tem um valor finito. Com isso, a equação de conservação da massa (equação 3) pode ser reescrita, conforme a equação 11:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \text{ em } \Omega \quad (11)$$

A velocidade de propagação do som para um escoamento isentrópico é dada pela equação 12:

$$c^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho} \quad (12)$$

Logo, considerando um escoamento isotérmico, $p = p(\rho)$, tem-se a equação 13:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + c^2 \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \text{ em } \Omega \quad (13)$$

3.4.4 Formulação numérica

As equações de conservação de massa e de quantidade de movimento são resolvidas empregando o Método dos Elementos Finitos (FEM), usando uma série de Taylor e o clássico método de Bubnov-Galerkin para a discretização do tempo e do espaço, respectivamente. O esquema de Taylor-Galerkin (TG) pode ser interpretado como a versão em elementos finitos do método de Lax-Wendroff usado em diferenças finitas. O esquema de TG foi empregado inicialmente por Donea (1984) e Donea *et al.* (1984) para problemas de advecção-difusão, por Laval & Quartapelle (1990) para escoamentos incompressíveis e por Löhner, Morgan & Zienkiewicz (1984) e Selmin *et al.* (1985) no contexto de problemas de escoamentos compressíveis e propagação de onda.

No programa HEXAFEM_3D_1FF, para a resolução das equações de conservação da massa e de Navier-Stokes emprega-se um esquema de Taylor-Galerkin explícito de dois passos desenvolvido a partir da formulação proposta por Braun & Awruch (2003) e Braun (2007). O esquema resultante é de segunda ordem no espaço e no tempo. Para discretizar a geometria emprega-se o elemento hexaédrico trilinear com integração analítica reduzida das matrizes em nível de elemento e a técnica de controle de modos espúrios proposta por Christon (1997), para mais detalhes ver Bono, Lyra & Bono (2011) e Bono, Lyra & Bono (2011a).

O esquema de dois passos introduzido por Kawahara & Hirano (1983) é aplicado sobre as equações que modelam o escoamento incompressível de um fluido newtoniano. Este método foi empregado exitosamente para escoamentos incompressíveis (BRAUN & AWRUCH, 2005; PETRY & AWRUCH, 2006; BONO, 2008) e compressíveis (BONO, 2008).

Os esquemas explícitos são condicionalmente estáveis, o que significa dizer que devem cumprir alguma condição de estabilidade que limite o valor do incremento de tempo utilizado. No caso de esquema explícito de TG para escoamentos incompressíveis, considerando um problema de advecção dominante, a condição de estabilidade pode ser expressa com a equação 14:

$$\Delta t_i = CS \frac{L_e}{c+v_i} \quad (14)$$

Onde:

Δt_i = incremento de tempo crítico do elemento i ;

CS = coeficiente de segurança (sempre $CS < 1$);

L_e = comprimento característico do elemento (menor aresta);

c = velocidade do som;

v_i = velocidade.

3.5 Pesquisas em ventilação

O estudo da ventilação ao redor de modelos com geometria cúbica é um dos mais experimentados e simulados, graças à simplicidade e à facilidade de validação dos resultados. Autores como Murakami & Mochida (1988), Castro & Robins (1997), (1963) e Richards, Hoxey & Short (2001) realizaram estudos utilizando está geometria.

Murakami & Mochida (1988) simularam computacionalmente o escoamento ao redor de um cubo, isto, numa época em que existiam poucos estudos numéricos de ventilação devido às pequenas capacidades computacionais, o que torna seu trabalho de grande importância para o desenvolvimento da CFD. Foi simulado um escoamento turbulento com número de Reynolds igual a 7×10^4 e para o perfil de velocidade do vento, utilizou-se a lei da potência com expoente igual a 0,25. Os resultados obtidos apresentaram boa qualidade e foram validados através de comparações com resultados experimentais. O trabalho foi realizado na Universidade de Tóquio (*University of Tokyo*), local em que vários outros trabalhos utilizando CFD foram realizados posteriormente.

Castro & Robins (1997), por sua vez, utilizaram um túnel de vento para realizar seus estudos, adotando uma escala de 1:300. O cubo utilizado possuía dimensão característica de 20 cm e o número de Reynolds foi de aproximadamente 10^5 . Os trabalhos de Richards, Hoxey & Short (2001) e Baines (1963) também foram realizados experimentalmente, contudo, foi utilizada escala real. Richards, Hoxey & Short (2001) adotaram um cubo com arestas de 6 m e um número de Reynolds de $4,1 \times 10^6$. Baines (1963) não fornece detalhes sobre as dimensões do cubo e nem sobre as condições de turbulência. Ambas pesquisas foram realizadas no Reino Unido.

O grupo de pesquisadores da Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016) estudou experimentalmente, através de túnel de vento, diversos

modelos de edificações. Foi utilizada uma escala de 1:100 para confecção das edificações e número de Reynolds de aproximadamente 8×10^4 . Os resultados são apresentados através da distribuição de coeficientes de pressão, calculados de acordo com a equação 15:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (15)$$

Onde:

p = pressão estática no ponto de avaliação;

p_∞ = pressão do fluxo livre, ou seja, sem perturbações;

ρ = densidade do fluido;

V_∞ = velocidade do fluxo livre na altura do contorno.

Dentre os casos estudados pelos pesquisadores da Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016), há dois casos que são de grande interesse para o presente trabalho. Um deles refere-se ao clássico contorno cúbico, com o qual os coeficientes de pressão médios são obtidos em forma de superfícies. O outro caso refere-se ao estudo de telhados de duas águas, no qual, é experimentada uma inclinação de 45° para o telhado e, semelhante ao caso anterior, são obtidas as superfícies de coeficientes de pressão médios. O primeiro caso possui ângulo de ataque do vento igual a 0° e o segundo possui ângulo de 90° .

Tominaga *et al.* (2015) também realizaram estudos em modelos de edifícios com telhado de duas águas. Eles simularam numericamente o escoamento do vento ao redor de telhados com inclinações de $16,7^\circ$, $26,6^\circ$ e $36,9^\circ$. O escoamento turbulento foi simulado com número de Reynolds igual a $3,5 \times 10^4$ e para o perfil de velocidade do vento, utilizou-se a lei da potência com expoente igual a 0,25. O interessante deste trabalho é que seus resultados foram validados através de comparações com resultados experimentais e foram obtidos os perfis de velocidade do vento nas proximidades do contorno sólido, que são de grande valor para comparações com os resultados obtidos no presente trabalho.

A pesquisa realizada por Jiang *et al.* (2003) abrange resultados numéricos computacionais e resultados experimentais obtidos no túnel de vento da Universidade de Cardiff (Cardiff University), no Reino Unido. O interessante deste trabalho é que as análises foram realizadas tanto no exterior quanto no interior das edificações,

considerando diferentes configurações de aberturas. É utilizado um número de Reynolds igual a $1,4 \times 10^5$, perfil de velocidade do vento através da lei da potência com expoente de 0,25 (para as simulações numéricas). Os resultados são apresentados utilizando distribuições em superfície e perfis verticais de velocidade, que são utilizados no presente trabalho para comparação direta e validação do método utilizado.

Péren *et al.* (2015) também fez um estudo considerando técnicas numéricas e experimentais. Os resultados experimentais foram obtidos no túnel de vento da Universidade de Concórdia (Concordia University), no Canadá, adotando uma escala de 1:200. Os resultados numéricos foram obtidos com um algoritmo baseado na CFD, adotando a lei do logaritmo para prescrição do perfil de velocidade do vento. Os modelos estudados apresentam aberturas que permitem a ventilação cruzada no interior dos edifícios, o que é de grande importância para o estudo de ventilação, já que tal aspecto demonstrou grande influência sobre a ventilação natural. As melhorias na ventilação observadas no trabalho de Péren *et al.* (2015) expressam a necessidade de também estudar-se a ventilação cruzada no presente trabalho.

4 METODOLOGIA

4.1 Características gerais

A primeira etapa na solução de problemas da Engenharia do Vento Computacional é a etapa de pré-processamento, que consiste na criação do domínio computacional, na discretização espacial desse domínio (aplicação do Método dos Elementos Finitos) e a aplicação das condições iniciais e condições de contorno relacionadas ao escoamento incidente (vento).

Para o desenvolvimento do presente trabalho emprega-se o programa HEXAFEM (BONO, LYRA & BONO, 2011), que faz uso de técnicas baseadas na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para simulação de escoamentos incompressíveis turbulentos. Para a discretização espacial do domínio de análise emprega-se o método dos elementos finitos (MEF), utilizando o elemento isoparamétrico hexaédrico de oito nós. O programa HEXAFEM_3D_IFF emprega o esquema explícito de dois passos de Taylor-Galerkin.

Para simular o escoamento turbulento emprega-se a Simulação de Grandes Escalas (LES) com o modelo clássico de Smagorinsky para as escalas inferiores à resolução da malha. Adota-se o valor de 0,10 para a constante de Smagorinsky. O programa HEXAFEM_3D_IFF não considera a geração de flutuações no campo de velocidade no escoamento de entrada nem lei de parede para modelar a região viscosa junto à parede. A validação do programa para exemplos clássicos com baixos e moderados números de Reynolds pode ser vista em Bono, Lyra & Bono (2011), Bono, Lyra & Bono (2011a), Cabral, Bono & Bono (2012) e Bono & Bono (2014).

Deve-se ressaltar, que o programa HEXAFEM_3D_IFF, é um simulador protótipo, robusto e com código aberto que está em constante desenvolvimento no grupo de pesquisa de Engenharia Computacional do Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste (UFPE).

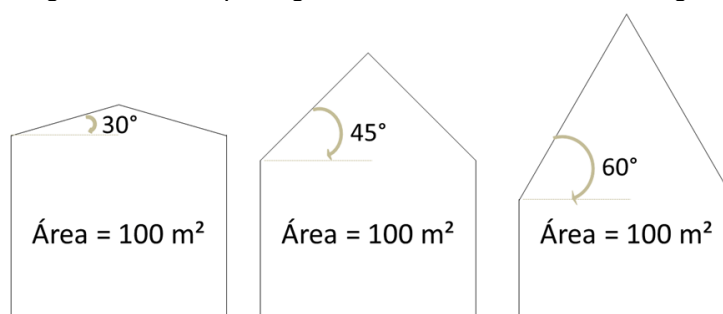
No presente trabalho são estudados dois tipos de problemas da Engenharia do Vento, no primeiro caso estuda-se o escoamento ao redor das edificações, já no segundo modelo analisa-se o escoamento no exterior e no interior das edificações.

4.2 Modelos de edificações com teto duas águas

A maioria das estruturas construídas no mundo para fins residenciais, comerciais e outros propósitos podem ser classificadas como edificações baixas (UEMATSU & ISYUMOV, 1999). Este tipo de edificação apresenta diferentes sistemas de cobertura, sendo geralmente os telhados de uma e duas águas os mais adotados, pois são os mais simples do ponto de vista construtivo e de projeto. No Brasil, as edificações com telhados de duas águas são muito empregadas, por exemplo em: pavilhões industriais, residências unifamiliares e multifamiliares, entre outros. Uma elevada porcentagem de edificações construídas no âmbito do Programa Minha Casa, Minha Vida adotam este tipo de solução construtiva.

A inclinação do telhado tem uma forte influência nas sucções locais, nos valores médios e nos valores máximos das sucções e sobrepressões (BLESSMANN, 2009), a diferença entre essas grandezas define a intensidade do escoamento do vento no interior da edificação. Neste âmbito, visa-se estudar numericamente como a posição geométrica da edificação e a inclinação do telhado influencia na distribuição de pressão nas fachadas da construção. Para isto, é simulado o escoamento ao redor de quatro modelos de edificações considerando-se telhados planos ou de duas águas. Os ângulos dos telhados investigados foram 0° , 30° , 45° e 60° , valores que permitem a comparação com resultados experimentais. Cada modelo foi investigado considerando-se dois ângulos de incidência do vento, 0° e 90° , ou seja, paralelo à cumeeira e perpendicular à mesma, pois há variação de alguns fenômenos físicos entre estes dois casos. As faces principais da edificação mantêm a mesma área para todos os casos citados, na Figura 5, mostram-se os tetos inclinados que foram analisados.

Figura 5 - Faces pentagonais dos casos de teto duas águas.

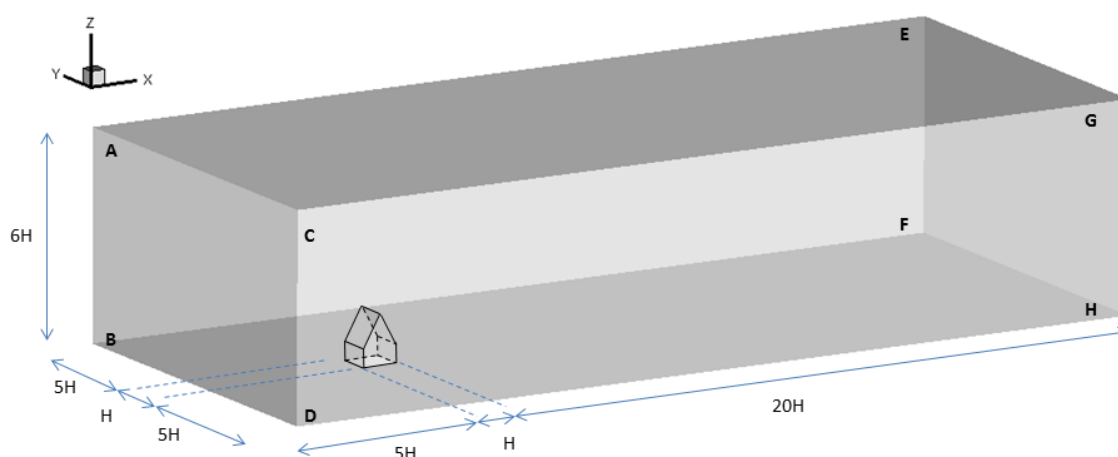


Fonte: Autor (2016).

Deve-se ressaltar que todas as simulações dos modelos de teto duas águas empregam as mesmas dimensões para o domínio computacional, condições iniciais e condições de contorno do escoamento, alterando-se apenas a malha de elementos finitos. As dimensões do domínio seguem as recomendações propostas por Franke *et al.* (2007) e Tominaga *et al.* (2008). Na Figura 5, mostra-se o domínio utilizado.

Foi adotado um perfil de velocidade exponencial (lei da potência) de camada limite atmosférica com expoente de 0,25 e ângulo de ataque igual a zero grau. O número de Reynolds é igual a 7×10^4 , calculado com base na velocidade de entrada $V_0 = 10$ m/s, que é atingida a uma altura de 20 m (δ), viscosidade cinemática de 1.43×10^{-3} m²/s (ν) e com dimensão característica da edificação (menor aresta) de 10 m (H). Na Tabela 1, apresentam-se as condições de contorno prescritas nas faces mostradas na Figura 6.

Figura 6 - Domínio computacional do primeiro modelo.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 1 - Condições de contorno dos modelos apresentados.

Face	C.C. eixo x	C.C. eixo y	C.C. eixo z
BDFH	Velocidade Nula	Velocidade Nula	Velocidade Nula
ABCD	Velocidade = $V_0 (z / \delta)^{0.25}$	Velocidade Nula	Velocidade Nula
ABEF	Velocidade = $V_0 (z / \delta)^{0.25}$	Velocidade Nula	Velocidade Nula
CDGH	Velocidade = $V_0 (z / \delta)^{0.25}$	Velocidade Nula	Velocidade Nula
EFGH	Pressão Nula		

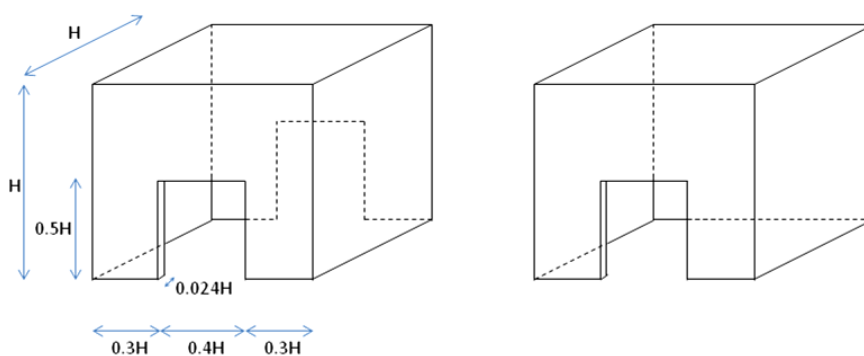
Fonte: Autor (2016).

Para o caso de telhado com inclinação nula foram empregadas 4 malhas de elementos finitos, utilizando-se na discretização das arestas do contorno 10, 20, 30 e 40 elementos, a fim de obter uma amostra que permita facilmente interpretar a influência do refinamento da malha sobre os resultados. Nos casos de teto com 30° , 45° e 60° , foi empregada uma discretização de 30 elementos nas arestas, a fim de obter bons resultados com um tempo de processamento satisfatório.

4.3 Modelo de edificações com aberturas

Com o intuito de estudar o escoamento externo e interno as edificações, utiliza-se um modelo cúbico no qual varia-se a quantidade de aberturas. No primeiro caso, existe apenas uma abertura, situada na fachada frontal, e no segundo caso analisado existem duas aberturas, uma na fachada frontal e outra na fachada posterior. Os dois casos deste modelo são apresentados na Figura 7, ambos possuem as mesmas dimensões, variando apenas a quantidade de aberturas.

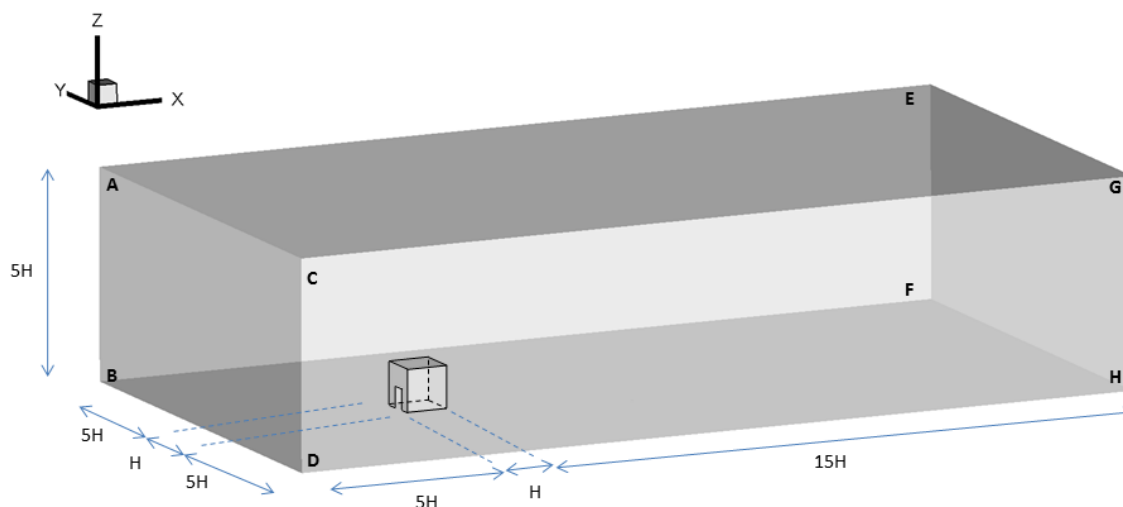
Figura 7 - Modelos dos casos abertos.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 8, mostra-se o domínio adotado para os dois casos. As condições de contorno são as mesmas que foram apresentadas na Tabela 1.

Figura 8 - Domínio computacional do modelo aberto



Fonte: Autor (2016).

A dimensão característica (H) adotada para este modelo, $H = 2.5$ m, são as mesmas que foram empregadas por Jiang *et al.* (2003), para que possa ser realizada uma posterior comparação entre os resultados. O perfil de velocidade típico de camada limite atmosférica com um ângulo de ataque igual a zero graus que incide diretamente sobre a fachada com abertura, caracteriza-se por um número de Reynolds igual a 1.3×10^5 , calculado com base na dimensão característica da edificação (dimensão das arestas do contorno da residência) e na velocidade de entrada $V_0 = 11$ m/s a 12.5 m (δ) de altura.

Para a discretização das arestas da edificação consideram-se 30 elementos, novamente, valor que atinge um custo próximo aos limites computacionais disponíveis para o presente trabalho.

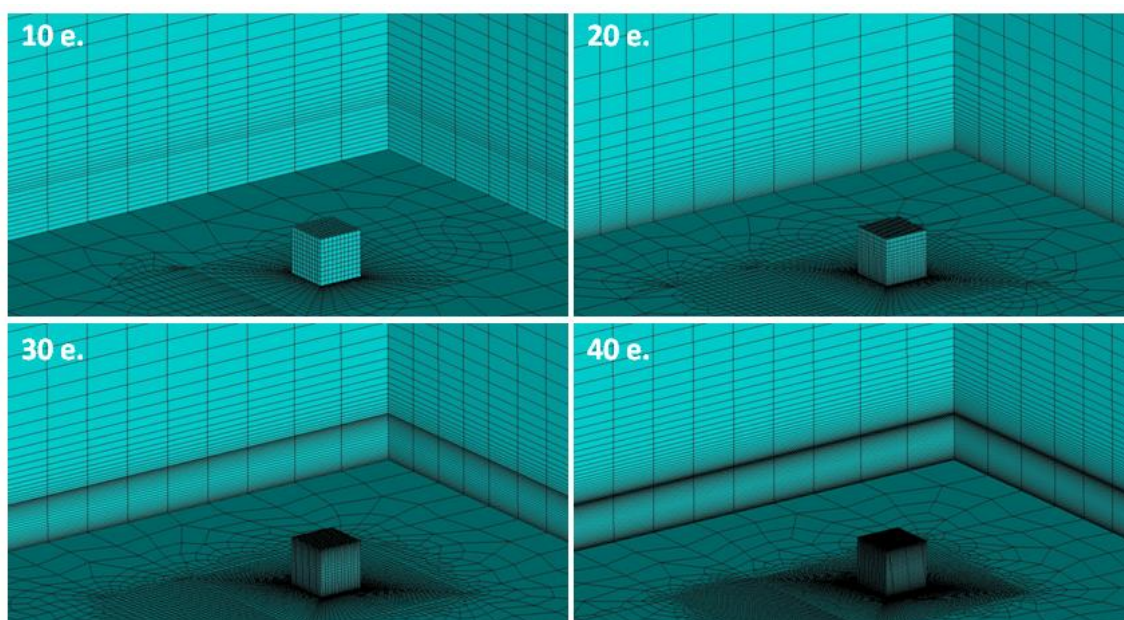
5 RESULTADOS

5.1 Modelo de edificação com teto plano

A fim de realizar um estudo de refinamento de malha para os casos estudados, faz-se uso de quatro diferentes níveis de discretização no caso da edificação com teto plano, conforme pode ser visto na Figura 9.

Para otimizar a distribuição dos elementos dentro do domínio, procura-se concentrar a maior parte dos elementos no entorno da edificação, que é a região de maior interesse já que ao redor da mesma acontecem os principais fenômenos físicos.

Figura 9 - Malhas computacionais para os casos de teto plano.



Fonte: Autor (2016).

Na Tabela 2, mostra-se para cada exemplo sua identificação, o número de elementos (*nele*) e o número de nós (*nno*).

Tabela 2 - Principais parâmetros das malhas no caso do exemplo de teto plano.

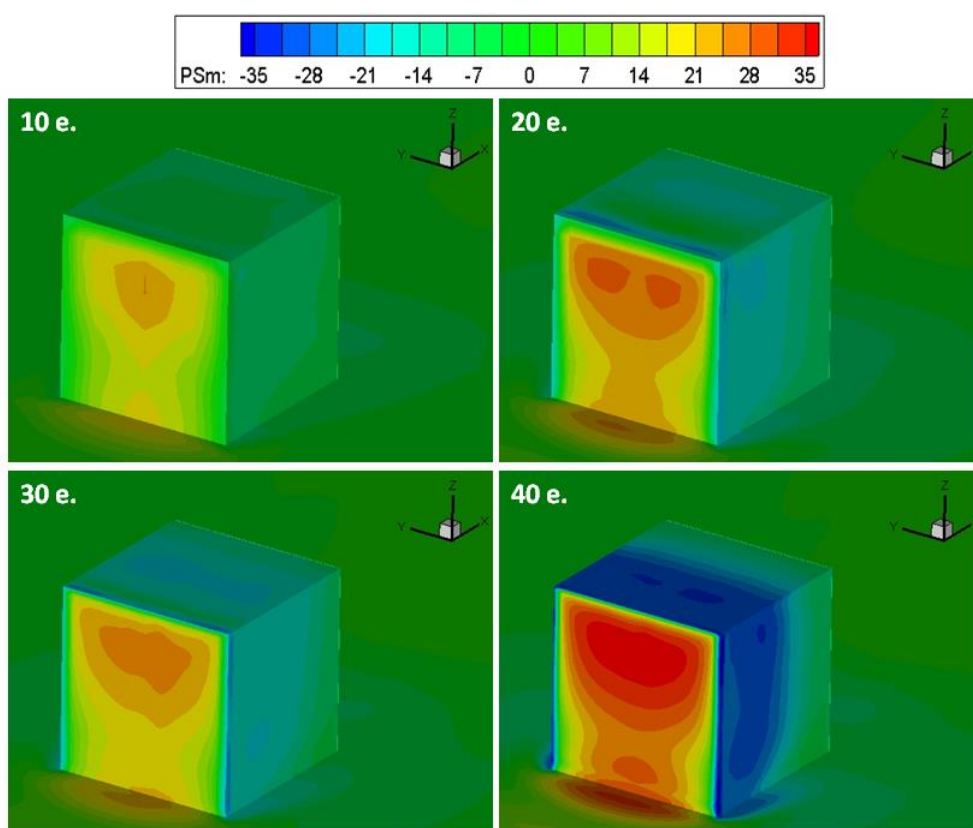
<i>Malha</i>	<i>nele</i>	<i>nno</i>
10e.	40.010	42.625
20e.	98.752	104.056
30e.	274.300	283.830
40e.	702.500	718.388

Fonte: Autor (2016).

Com a análise dos resultados das quatro malhas, tem-se uma estimativa do melhor refinamento para os demais casos estudados no presente trabalho.

Todos os resultados mostrados a seguir representam valores médios, ou seja, os valores são obtidos fazendo a média aritmética dos valores instantâneos durante um determinado intervalo de tempo de simulação. Na Figura 10, mostram-se as distribuições de pressão obtidas na presente simulação numérica para as quatro malhas empregadas.

Figura 10 - Distribuição de pressão média nos casos de teto plano.



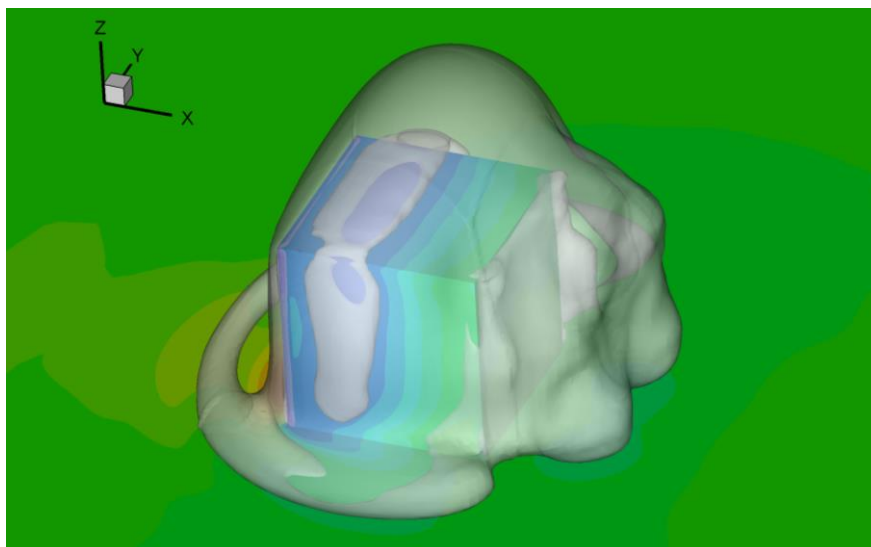
Fonte: Autor (2016).

Pode-se observar que na região de barlavento acontece a máxima pressão e na região da esteira (sotavento) temos a mínima pressão. Percebe-se que o maior refinamento da malha permite captar maiores amplitudes de pressão, além de torná-los mais suaves e detalhados, ocasionando resultados mais próximo aos apresentados por outros autores.

A fim de visualizar os fenômenos físicos no entorno das faces das edificações, na Figura 11 são mostradas iso-superfícies (superfície que constitui um valor constante de pressão) de sucção sobre o gráfico de pressões no caso da malha mais

refinada (40 elementos nas arestas). Percebe-se claramente a grande semelhança entre a Figura 11 e a Figura 4, observando a mesma topologia de escoamento.

Figura 11 - Iso-superfícies de sucção.

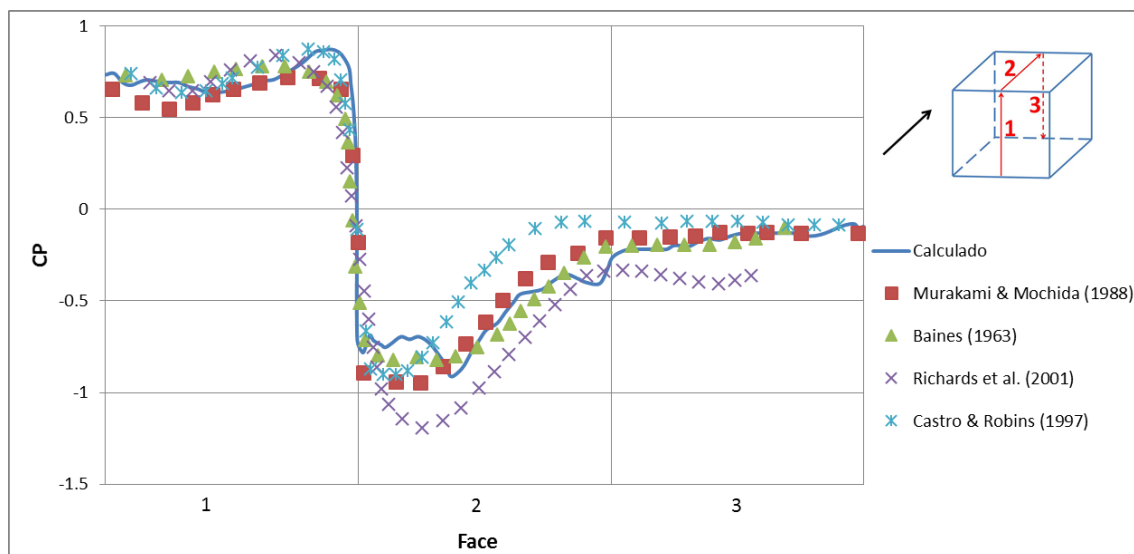


Fonte: Autor (2016).

Na Figura 12, mostra-se o gráfico de distribuição do coeficiente de pressão sobre o cubo para o caso da malha com 40 elementos nas arestas. O coeficiente de pressão foi calculado tomando como referência a pressão no plano de saída, de acordo com os valores da Tabela 1.

Também, são mostrados na Figura 12 os resultados obtidos numericamente por Murakami & Mochida (1988), experimentalmente em túnel de vento por Castro & Robins (1997) e em escala real por Baines (1963) e Richards, Hoxey & Short (2001). Pode-se observar que existe uma ótima concordância entre os resultados obtidos na presente simulação os resultados apresentados por outros autores.

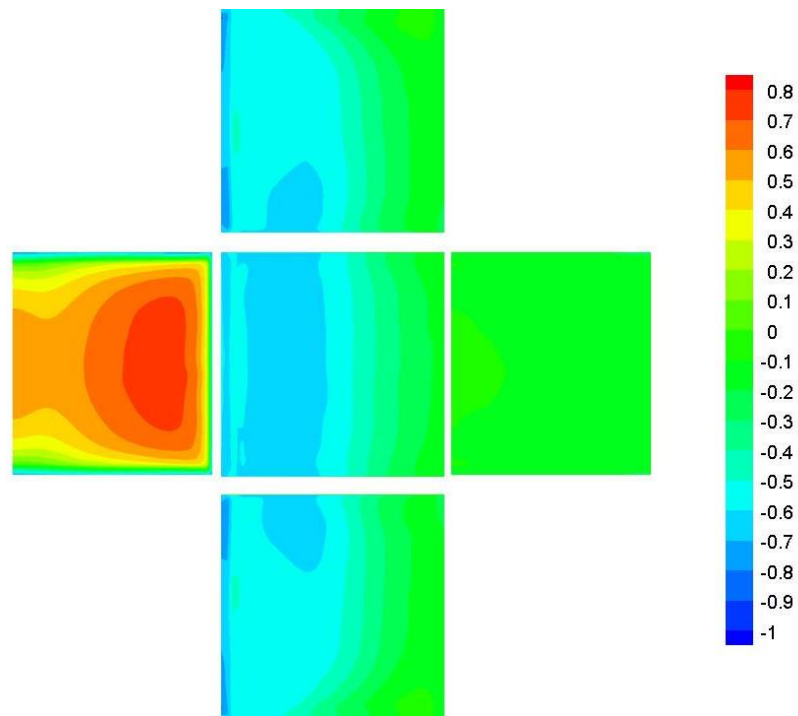
Figura 12 - Comparação dos coeficientes de pressão para o caso do cubo.



Fonte: Autor (2016)

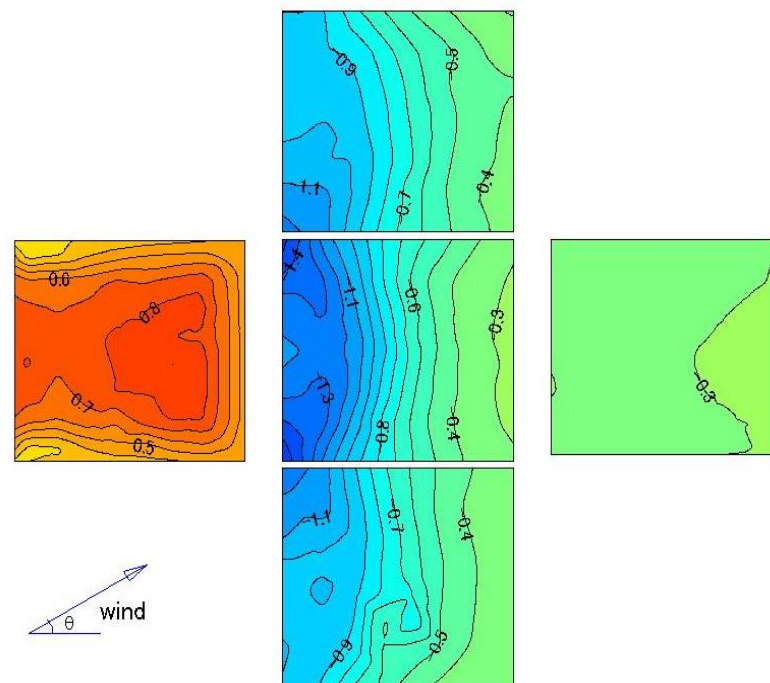
A Figura 13 apresenta a distribuição de pressões em todas as faces do contorno, utilizando novamente o caso da malha mais refinada (40 elementos). Observa-se que a máxima pressão acontece na região de barlavento e a região de sotavento apresenta a mínima pressão. Na Figura 14, observa-se que os coeficientes de pressão calculados são muito similares aos obtidos experimentalmente no túnel de vento do TPU Aerodynamic Database da Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016), havendo somente uma leve diferença na face superior do cubo onde acontecem fortes gradientes de pressão devido à separação do escoamento. Esta discrepância poderia ser reduzida aumentando o refinamento da malha na região dos fortes gradientes de pressão, contudo, o custo computacional, para este caso, encontra-se próximo aos limites disponíveis para os autores do presente trabalho.

Figura 13 - Distribuição dos coeficientes de pressão.



Fonte: Autor (2016).

Figura 14 - Distribuição dos coeficientes de pressão. Dados experimentais.



Fonte: Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016).

5.2 Modelos de edificações com teto duas águas

As edificações com telhado de duas águas são muito comuns em todo território nacional, logo é muito importante analisar o escoamento ao redor deste tipo de construção. Conforme citado no item 4.2 deste trabalho, são simulados quatro casos com diferentes inclinações de teto duas águas, uma destas inclinações é nula e já foi apresentada no item anterior, as demais inclinações (30°, 45° e 60°) serão apresentadas a seguir.

Na Tabela 3, mostra-se o número de elementos e de nós para cada um dos casos analisados, considerando uma discretização de 30x30x30 elementos nas arestas da edificação.

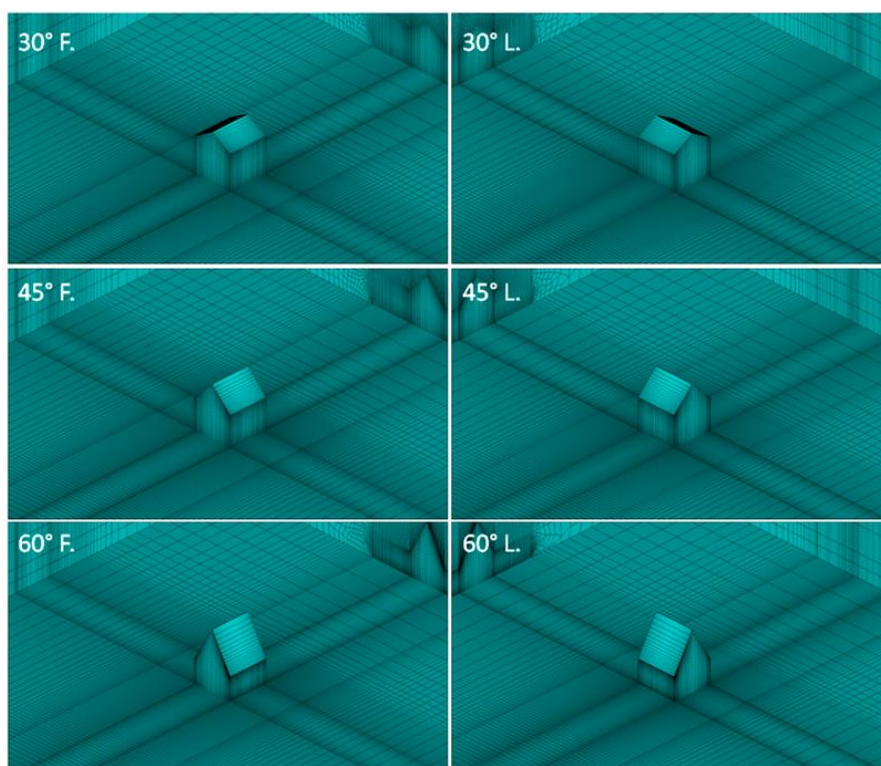
Tabela 3 - Dados das malhas para a edificação com telhado de duas águas.

<i>Malha</i>	<i>nne</i>	<i>nno</i>
30° Frontal	1.139.562	1.162.877
30° Lateral	1.150.836	1.138.608
45° Frontal	1.158.516	1.181.948
45° Lateral	1.136.776	1.160.667
60° Frontal	1.140.210	1.163.529
60° Lateral	1.131.400	1.155.249

Fonte: Autor (2016).

Na Figura 15, apresentam-se as malhas para os seis casos estudados, nota-se que novamente concentrou-se uma maior quantidade de elementos nas proximidades da edificação, a fim de melhorar os resultados sem comprometer o custo computacional.

Figura 15 - Malhas nos casos da edificação com teto duas águas.

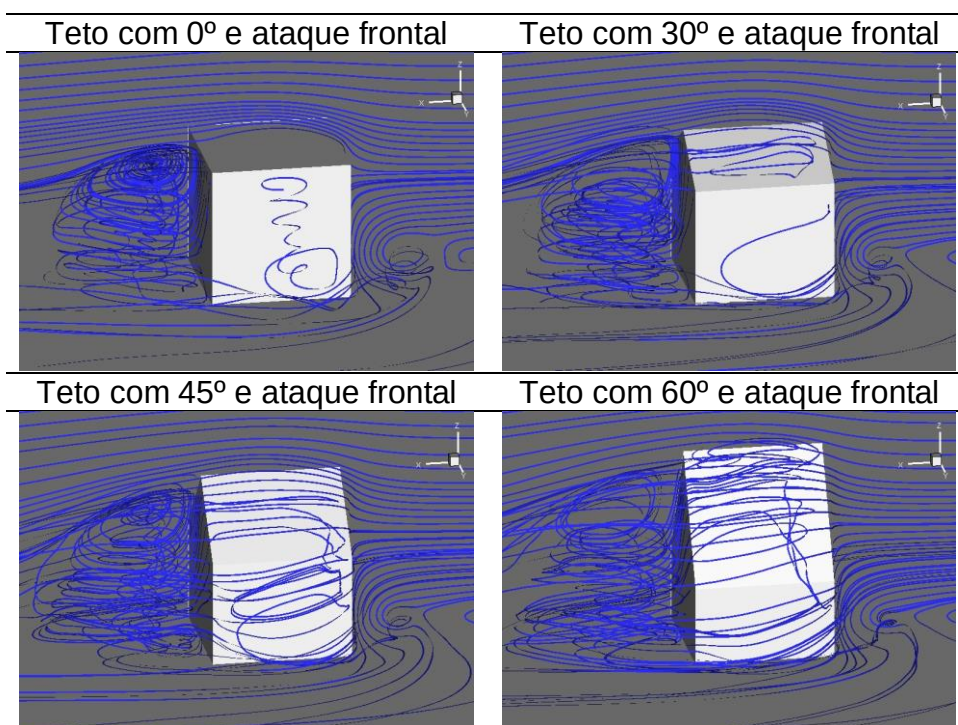


Fonte: Autor (2016)

O movimento das partículas do ar em torno das edificações pode ser visto através da aplicação das linhas de corrente, o que ajuda a compreender melhor a topologia do escoamento e os fenômenos físicos que ocorrem ao redor da construção. Nas Figuras 17 e 18, apresentam as linhas de corrente para os casos de teto duas águas (inclusive para o caso de inclinação nula).

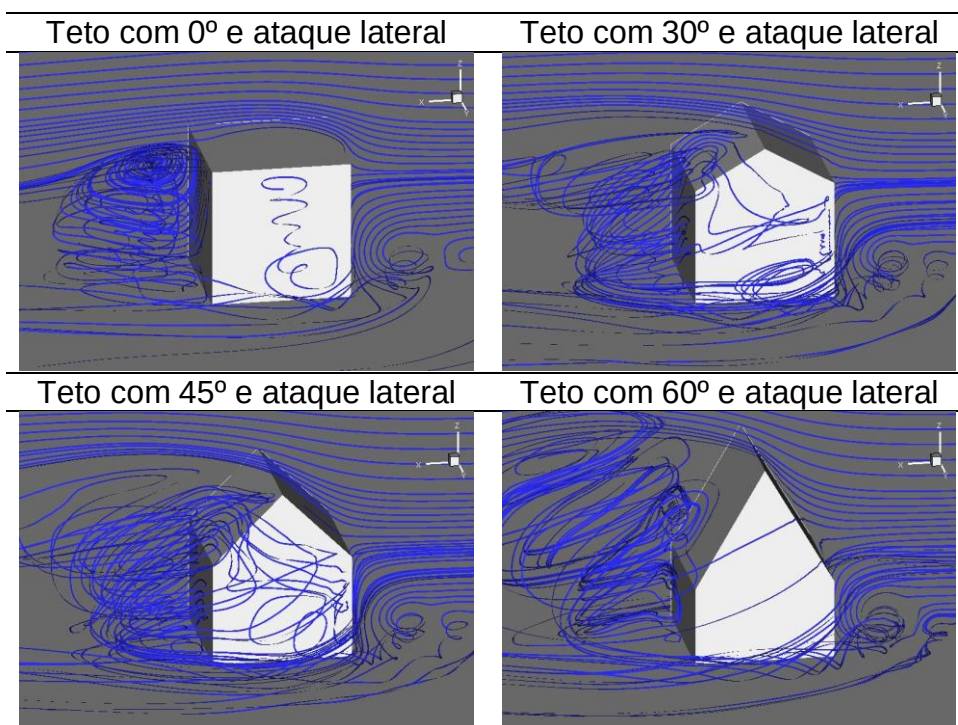
Pode-se observar que devido à orientação da edificação e inclinação do telhado as linhas de corrente são fortemente afetadas, colocando em evidência para cada caso analisado as diferentes topologias do escoamento. Em cada imagem presente nas Figuras 16 e 17, pode-se ver a formação do vórtice de base à direita da edificação (região de barlavento), que ganham tamanho e se prolongam até a região posterior, e à esquerda (região de sotavento) origina-se uma região de recirculação do vento, criando o vórtice em arco, o qual fica bastante evidente observando as linhas de corrente. Há também os vórtices que se formam nas laterais das edificações, que variam de acordo com cada caso.

Figura 16 - Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque do vento nulo.



Fonte: Autor (2016).

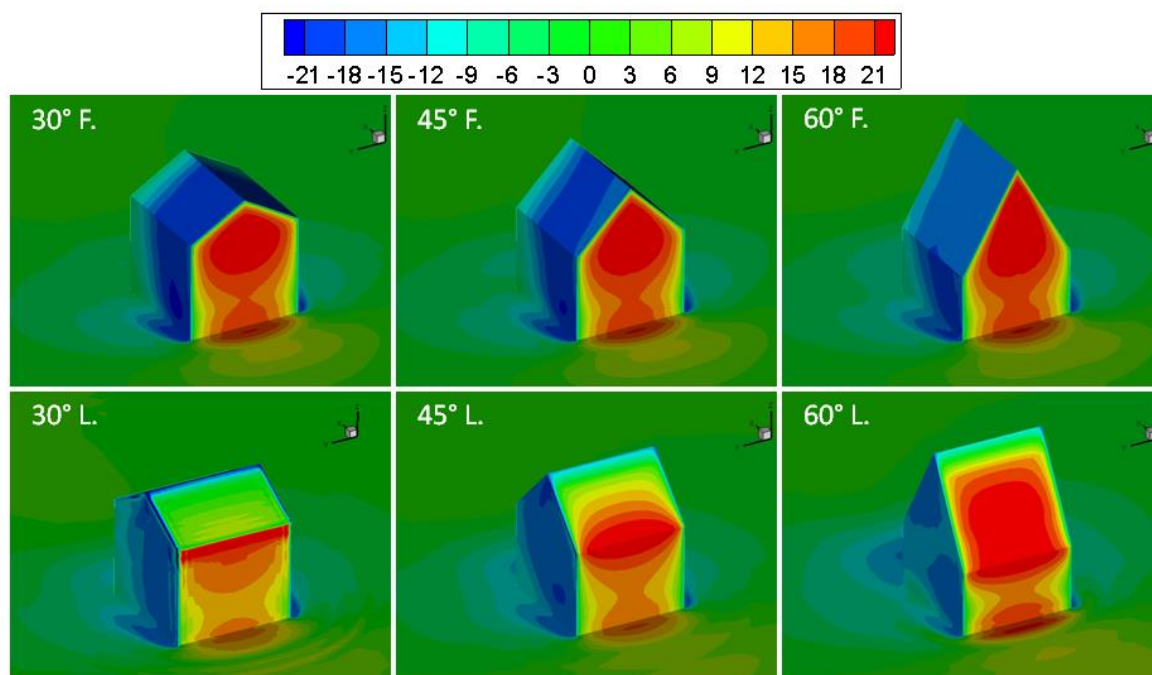
Figura 17 - Linhas de corrente para os casos de ângulo de ataque do vento de 90°.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 18, mostram-se as distribuições de pressão média para todas as edificações com teto duas águas.

Figura 18 - Distribuição de pressão para o caso da edificação com teto duas águas.

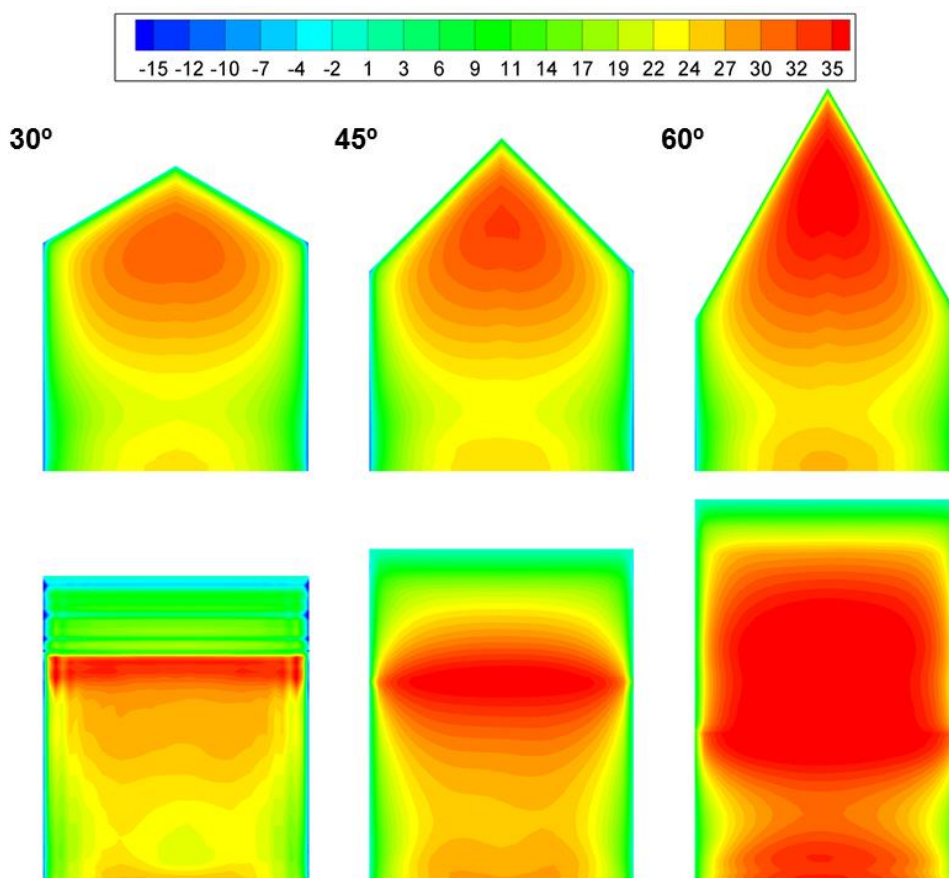


Fonte: Autor (2016).

Observa-se que quando se incrementa o ângulo de inclinação do telhado, a área de alta pressão aumenta, fazendo que exista uma maior diferença de pressão entre as regiões à montante e jusante da edificação. É justamente a diferença de pressão entre as fachadas que gera o escoamento do vento no interior da edificação, logo, a condição ótima é aquela em que se tem a maior diferença possível entre as pressões das fachadas.

Para analisar o gradiente de pressão entre as fachadas, na Figura 19 mostram-se as superfícies de diferenças de pressão entre as faces de barlavento e sotavento. São apresentados para os casos com ângulo de incidência do vento de 0° , na parte superior da imagem, e para os casos com ângulo de incidência do vento de 90° , na parte inferior da imagem. Os pontos de maior diferença de pressão constituem as melhores regiões para localizar aberturas, já que possibilitariam maximizar o fluxo de ar no interior da edificação. Em função dos resultados apresentados, pode-se observar que o caso do telhado com a máxima inclinação (60°) mostra uma maior região possibilitando que a locação das aberturas seja mais fácil e eficiente.

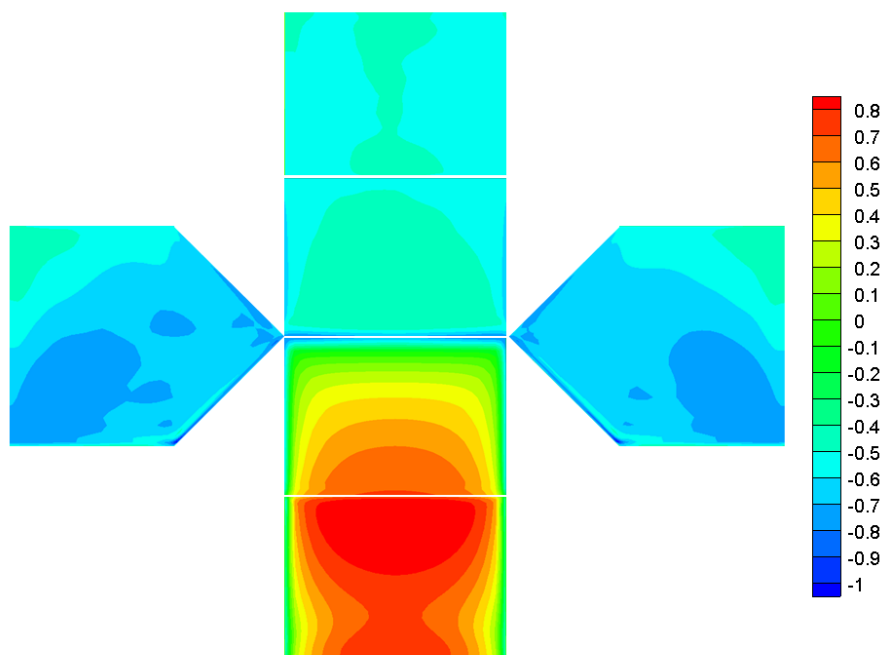
Figura 19 - Diferenças de pressão entre as faces de barlavento e sotavento.



Fonte: Autor (2016).

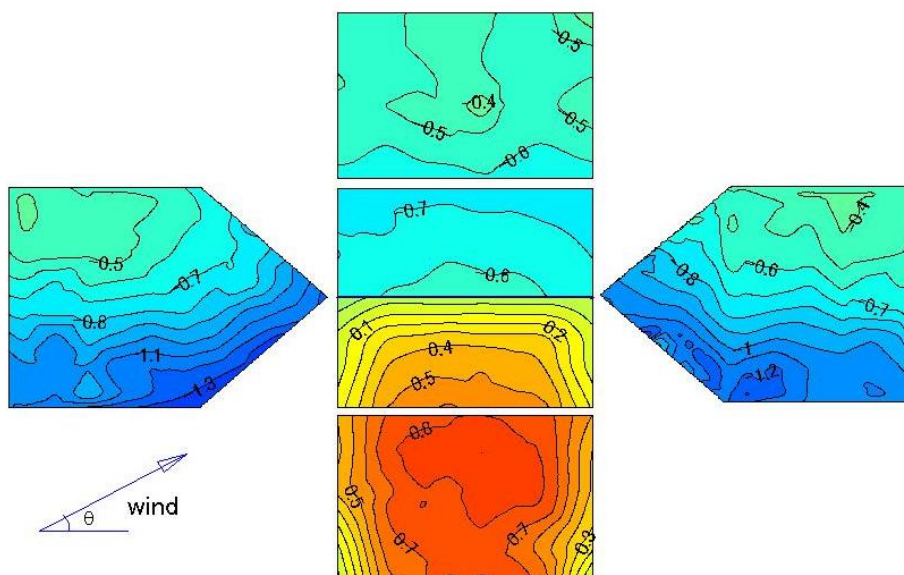
Nas Figuras 20 e 21, apresenta-se a distribuição dos coeficientes de pressão obtidos numericamente e experimentalmente para o caso da edificação com inclinação do telhado de 45° e ângulo de ataque do vento de 90°. Pode-se perceber algumas pequenas diferenças entre os resultados experimentais, obtidos pelos pesquisadores da Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016), e os obtidos na presente simulação numérica, principalmente nas regiões de fortes gradientes. Essa discrepância poderia ser reduzida aumentando o refinamento da malha nas regiões de separação do escoamento. Mesmo com essas diferenças, os resultados apresentam uma ótima concordância e demonstram que os resultados obtidos com o programa HEXAFEM_3D_IFF são muito bons.

Figura 20 - Distribuição dos coeficientes de pressão para o caso de 45° lateral.



Fonte: Autor (2016).

Figura 21 - Distribuição dos coeficientes de pressão, caso de 45° e $\theta = 90^\circ$. Dados experimentais.



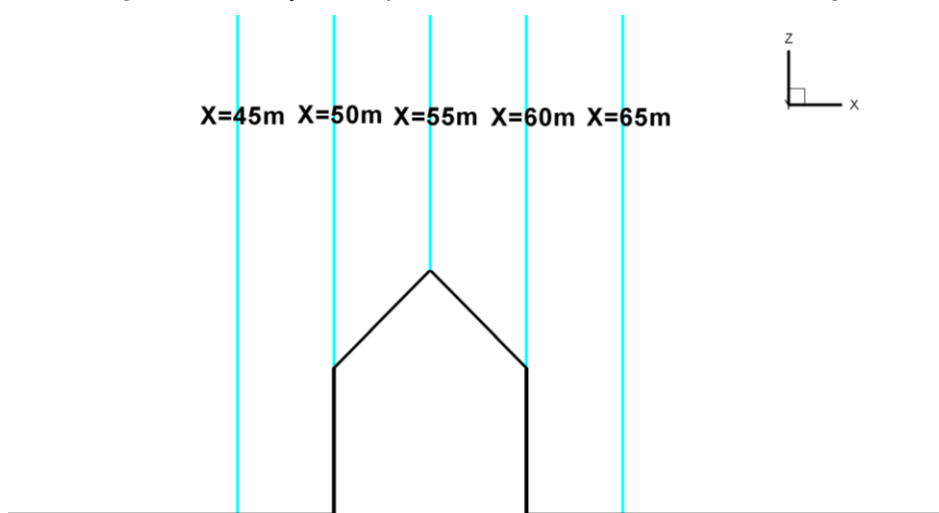
Fonte: Universidade Politécnica de Tóquio (GCOE PROGRAM, 2016).

Posteriormente, perfis de velocidade da componente no eixo x (V_x) são extraídos em determinadas posições longitudinais do domínio computacional, tais posições são especificadas na Figura 22. Na Figura 23, mostra-se uma comparação qualitativa entre os resultados obtidos na presente simulação e os apresentados por Tominaga *et al.* (2015) dessa componente. Nesta Figura 23, plota-se a razão entre a

componente da velocidade com relação ao eixo x (V_x) e a velocidade característica na altura do beiral (H_E), que para o caso de teto inclinado com 45° , $H_E = 7.5$ m. Deve-se ressaltar que o valor de H_E e a velocidade de entrada para o caso de Tominaga *et al.* (2015) são diferentes. Logo, há uma significativa diferença entre os gráficos, contudo isso não interfere na comparação qualitativa entre os resultados.

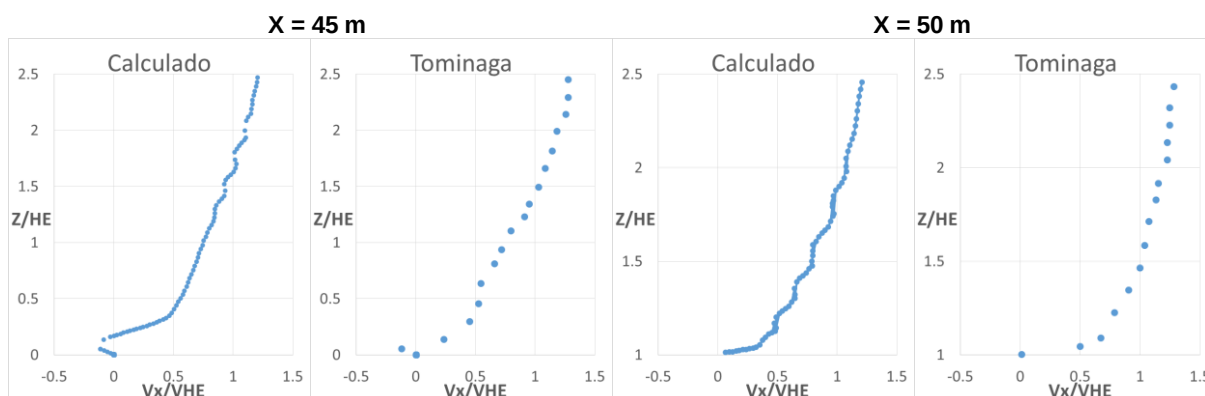
Pode-se perceber que existe uma grande semelhança entre os dois casos comparados, por exemplo os pontos de recirculação, alguns picos de velocidade e os formatos dos perfis apresentam uma boa concordância.

Figura 22 - Posição dos perfis de velocidade, caso de Tominaga.



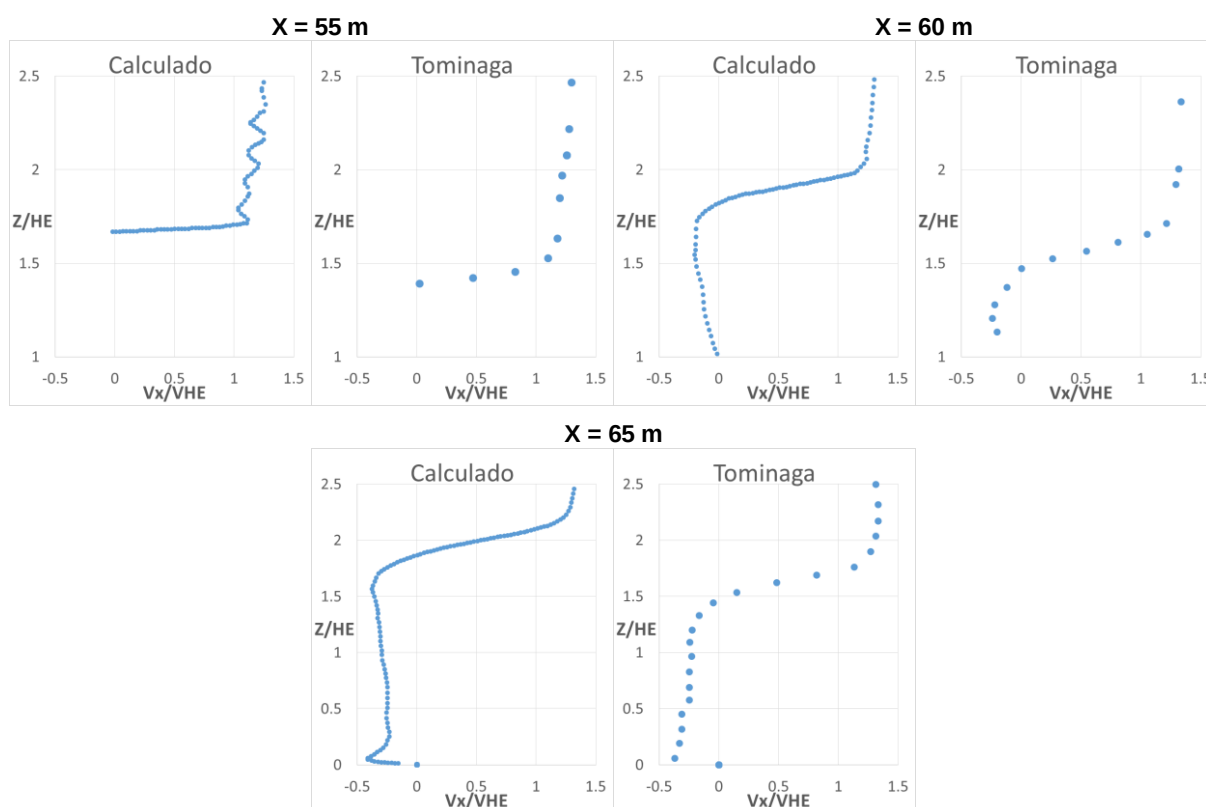
Fonte: Autor (2016).

Figura 23 - Perfis de velocidade para o caso de duas águas, parte 1.



Fonte: Autor (2016).

Figura 24 - Perfis de velocidade para o caso de duas águas, parte 2.



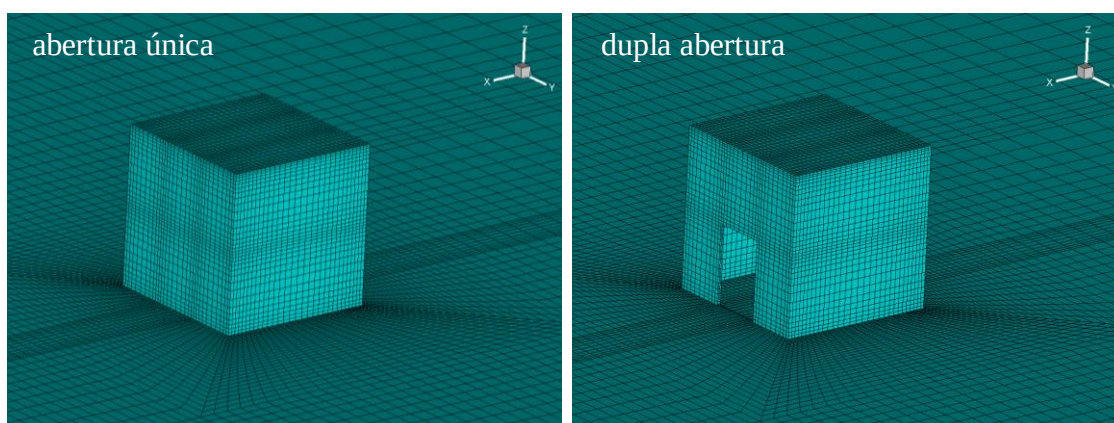
Fonte: Autor (2016).

5.3 Modelos de edificações com aberturas

Neste caso estuda-se o escoamento interno e externo à edificação, obtendo-se, portanto, os principais fenômenos característicos da ventilação natural. Como já citado no item 4.3, são simulados dois casos, onde varia-se apenas a quantidade de aberturas da edificação, conforme a Figura 7.

Na Figura 24, mostram-se as malhas empregadas para simular o problema. A discretização do domínio mantém o mesmo padrão do modelo anterior, utilizando-se 30x30x30 elementos nas arestas dos contornos cúbicos. As malhas apresentam aproximadamente 784.000 nós e 756.000 elementos.

Figura 25 - Malhas para o caso da edificação com aberturas.

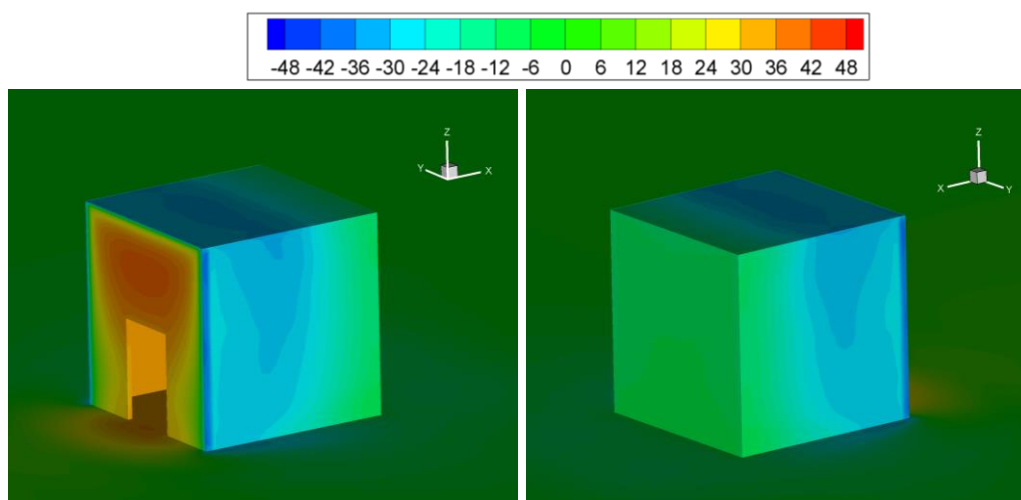


Fonte: Autor (2016).

Nas Figuras 25 e 26, apresenta a distribuição de pressão média para os dois casos analisados, ou seja, o caso com uma única abertura na posição frontal e o caso com dupla abertura. As figuras mostram as faces de barlavento (à esquerda) e sotavento (à direita).

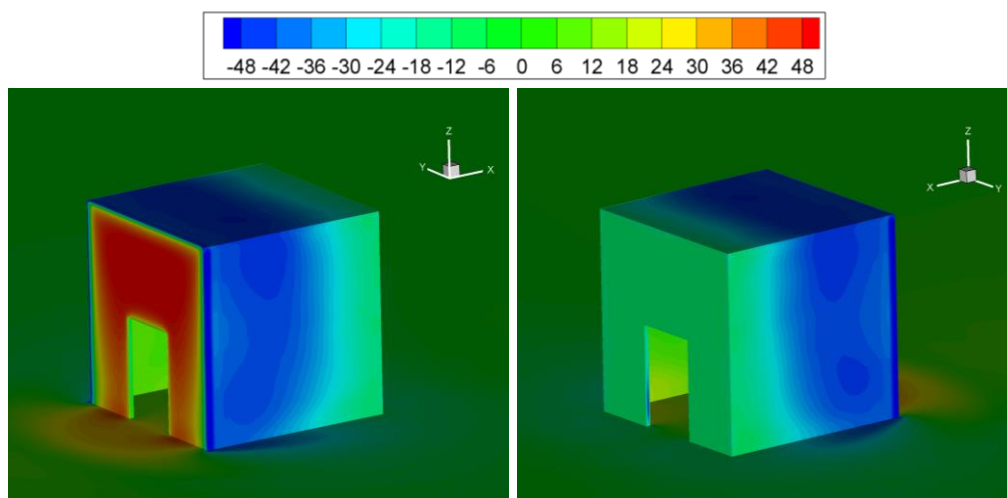
Pode-se observar que a principal diferença entre os dois casos dá-se pela diferença entre os valores dos picos de pressão, que são consideravelmente maiores para o caso da abertura dupla. Portanto, o caso com dupla abertura possui maior potencial de ventilação interna. Tudo isso pode ser comprovado observando as linhas de corrente e a distribuição da componente de velocidade na direção x no plano de simetria xz , conforme a Figura 27.

Figura 26 - Distribuição de pressão para o caso de abertura única.



Fonte: Autor (2016).

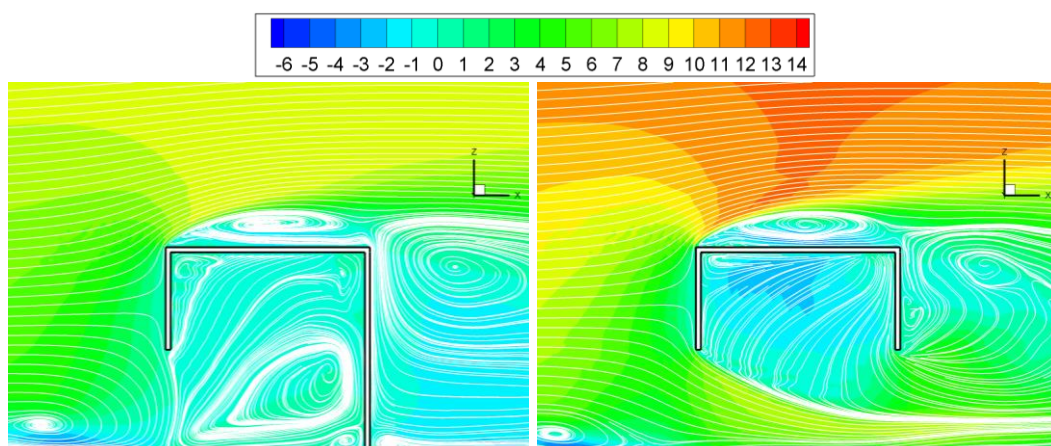
Figura 27 - Distribuição de pressão para o caso de dupla abertura.



Fonte: Autor (2016).

A diferença entre os potenciais de ventilação interna pode ser comprovada observando as linhas de corrente e a distribuição da componente de velocidade na direção x no plano de simetria xz , conforme a Figura 28.

Figura 28 - Linhas de corrente em plano e velocidade em x no interior dos casos vazados.

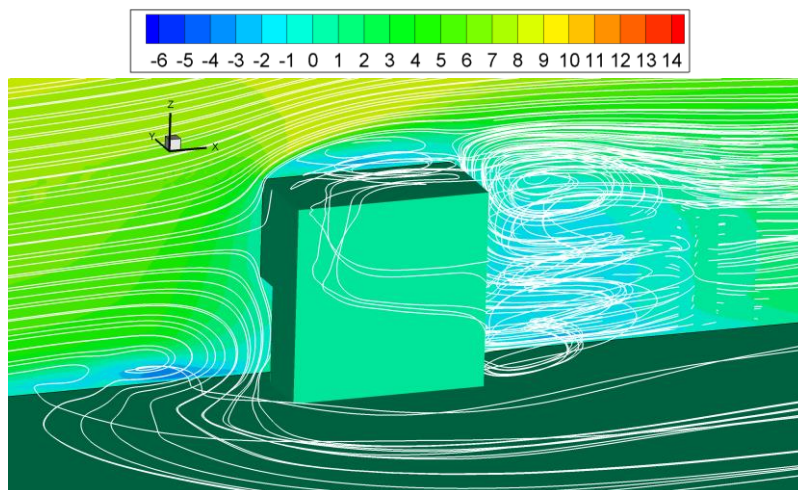


Fonte: Autor (2016).

Nas Figuras 28 e 29, apresentam-se as linhas de corrente para os casos das edificações com aberturas, contudo, nestas figuras visualiza-se os efeitos do escoamento tridimensionalmente. É adicionado um plano que “corta” transversalmente o domínio exatamente ao seu meio, onde também há a distribuição da componente de velocidade no eixo x .

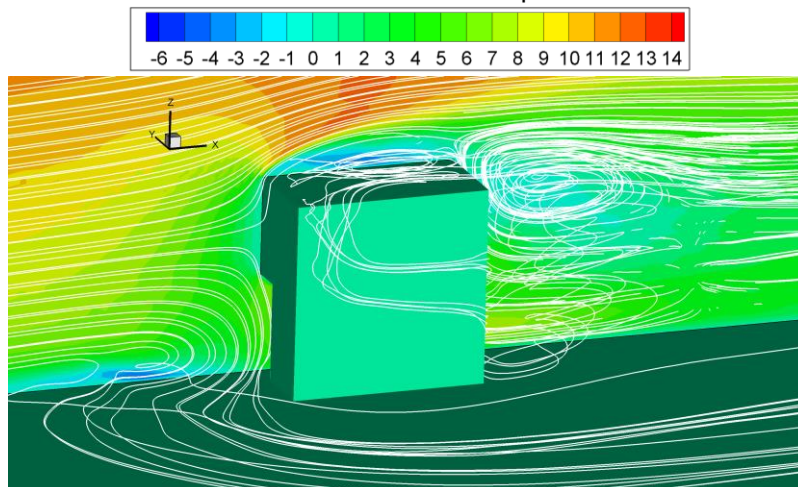
Pode-se perceber que a segunda abertura favorece consideravelmente a ventilação interna no cômodo, além de diminuir a recirculação e a formação de vórtices, amenizando desta forma a turbulência no interior e no exterior da edificação.

Figura 29 - Linhas de corrente e velocidade em x para o caso de abertura única.



Fonte: Autor (2016).

Figura 30 - Linhas de corrente e velocidade em x para o caso de abertura dupla.



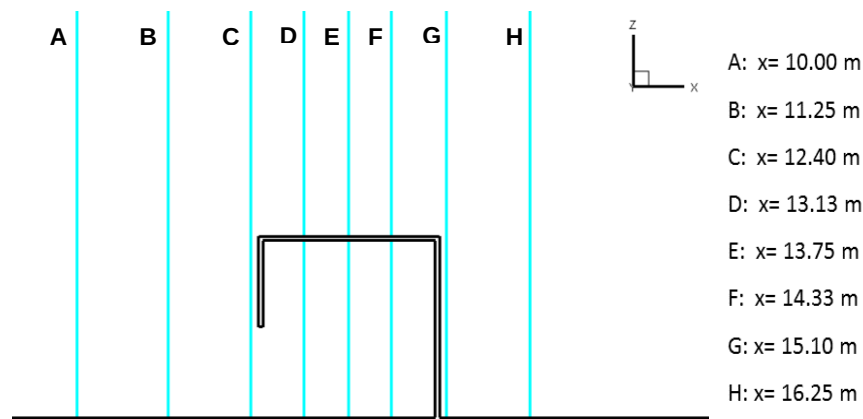
Fonte: Autor (2016).

No primeiro caso, observa-se que a entrada e a saída do escoamento na construção dão-se pela mesma abertura, dificultando a troca de ar com a zona externa. Já para o segundo caso, a abertura com vento predominante é integralmente responsável por introduzir o ar no compartimento, enquanto a segunda abertura permite a saída deste ar, com isso cria-se um fluxo regular entre as duas aberturas. Neste segundo caso, ocorre a ventilação cruzada, que é responsável por fornecer conforto térmico em grande parte das edificações.

Finalmente, compara-se os resultados obtidos no presente trabalho com os apresentados por Jiang *et al.* (2003) dos perfis de velocidade em diferentes posições longitudinais no caso de uma única abertura. Esta comparação permite, mais uma vez, validar o programa utilizado e demonstrar a precisão dos resultados obtidos no presente trabalho. Os perfis de velocidade são extraídos nas proximidades do contorno, conforme observa-se na Figura 30.

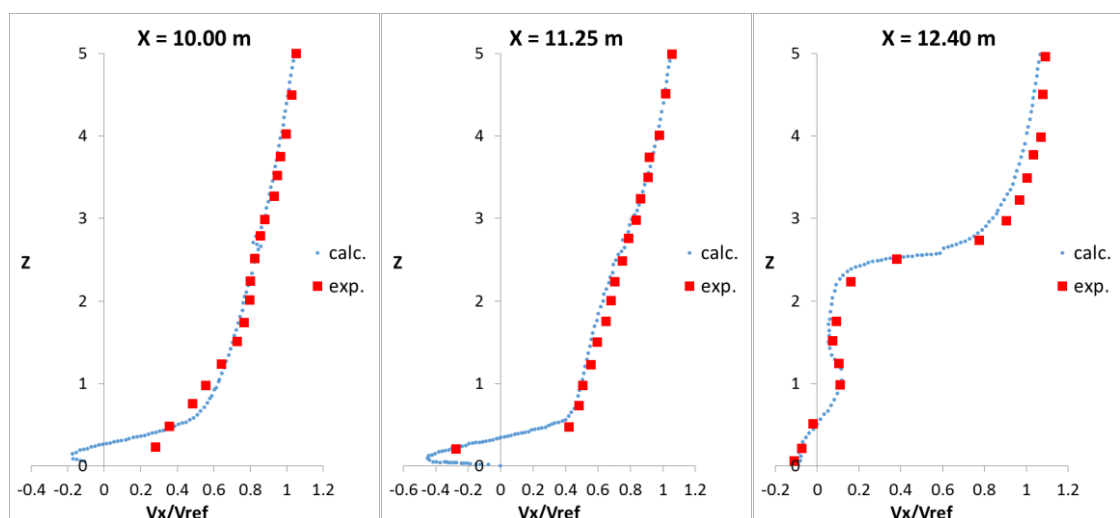
Na Figura 31 e 32, mostra-se a comparação entre os perfis de velocidade. Os resultados apresentam uma ótima concordância quando comparados com os apresentados por Jiang *et al.* (2003).

Figura 31 - Posição dos perfis de velocidade, caso de Jiang *et al.* (2003).



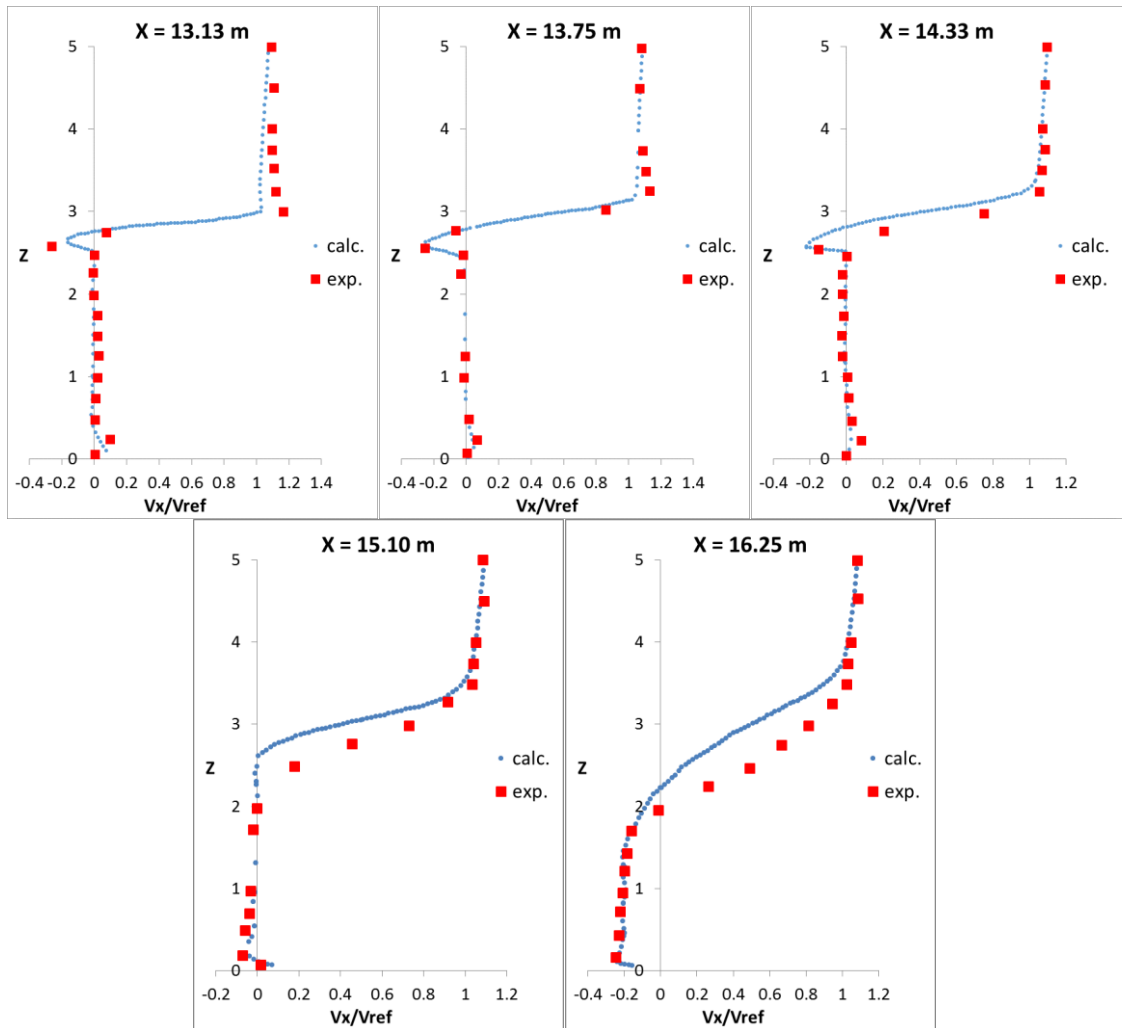
Fonte: Autor (2016).

Figura 32 - Comparação dos perfis de velocidade do caso de abertura única, parte 1.



Fonte: Autor (2016).

Figura 33 - Comparação dos perfis de velocidade do caso de abertura única, parte 2.



Fonte: Autor (2016).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões da Pesquisa

A partir dos resultados apresentados neste trabalho e da análise dos mesmos, pode-se concluir que:

- A utilização de métodos computacionais na análise da dinâmica de fluidos mostrou-se muito eficiente nas situações mostradas acima, esses métodos permitem uma análise bem detalhada das principais variáveis do problema (velocidade e pressão) permitindo assim estudar e analisar o comportamento do escoamento de fluido tanto no interior quanto no exterior das geometrias modeladas;
- A simulação através do Método dos Elementos Finitos obtém de forma satisfatória as principais variações a qual o escoamento está sujeito: mudanças de velocidades, pressão e formação de vórtices podem ser analisadas a partir dos resultados obtidos;
- A validação feita através da comparação dos resultados obtidos na presente simulação com os resultados apresentados por outros autores, demonstrou a eficiência do programa HEXAFEM_3D_IFF;
- Pôde-se observar que, dependendo da geometria (ângulo de inclinação do telhado) e posicionamento (ângulo de incidência do vento) da edificação, a topologia do escoamento sofre variações consideráveis, causando diferentes distribuições de pressão;
- Percebe-se que na região de barlavento acontece a máxima pressão e na região da esteira (sotavento) temos a mínima pressão. Com relação à inclinação do telhado, observa-se que quando se incrementa o ângulo do mesmo, a área de alta pressão aumenta, fazendo que exista uma maior região com diferença de pressão entre as regiões à montante e jusante da edificação;
- Também foi possível observar que a disposição conveniente das aberturas nas fachadas orientadas a barlavento e nas fachadas a sotavento, favorecerão a ventilação cruzada permitindo uma boa circulação de ar entre os ambientes;
- Na comparação das edificações com aberturas, percebe-se que há uma significativa melhora da ventilação natural quando é acrescentada uma

segunda abertura no compartimento estudado. Com isto, percebe-se a importância da ventilação cruzada e dos aspectos construtivos que favorecem a mesma.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos recomenda-se:

- Analisar o posicionamento das aberturas da edificação, a fim de prover maior eficiência na ventilação cruzada;
- Simular um conjunto de edificações, a fim de avaliar a influência de cada edifício;
- Implementar no programa HEXAFEM_3D_IFF a geração de flutuações no campo de velocidade no escoamento de entrada e uma lei de parede para modelar a região viscosa junto aos contornos sólidos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento Bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ALLARD, F.. **Natural ventilation in building: a design handbook**. Londres: James & James, 1998. 356 p.
- ALLOCA, C.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L. R.. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**, Londres, v. 35, p. 785-795, 2003.
- ARAÚJO, C. V. A.; CUNHA, L. J. B. F.. Proposta de método para potencializar o uso da ventilação natural. Canela: **Anais XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2010.
- BAINES, W. D.. **Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings, Proceedings Symp.** Reuno Unido: Wind Effects on Buildings and Structures, 1963.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C.. **Ventilação Natural em Edificações**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA - Eficiência Energética em Edificações, 2010.
- BLESSMANN, J.. **Ação do Vento em Telhados**. Rio Grande do Sul: UFRGS Editora, 2009.
- BONO, G.; AWRUCH, A. M.. Comparative study of structured and unstructured meshes for compressible flows. **Anais COBEM – XIX Congresso Internacional de Engenharia Mecânica**. Brasília, DF. 2007.
- BONO, G.. **Simulação numérica de escoamentos em diferentes regimes utilizando o método dos elementos finitos**. 2008. Tese de Doutorado (PROMEC) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BONO, G.; AWRUCH, A. M.. Emprego da CFD para o estudo de um Corpo Rombudo em Regime Supersônico. San Carlos de Bariloche, Argentina: **Mecânica Computacional**, v. 29, p. 4885-4895, 2010.
- BONO, G.; LYRA, P. R. L.; BONO, G. F. F.. Simulação Numérica de Grandes Escalas em Escoamentos Incompressíveis através do Método dos Elementos Finitos. **Anais CIBEM10 – X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica**. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. v. 1. p. 721-733.
- BONO, G.; LYRA, P. R. L.; BONO, G. F. F.. Solução numérica de escoamentos incompressíveis com Simulação de Grandes Escalas. Rosário, Argentina: **Mecânica Computacional**, v. 30, p. 1423-1440, 2011.

BONO, G.; BONO, G. F. F.. Estudo numérico de supressores de vórtices tipo "splitter plate". San Carlos de Bariloche, Argentina: **Mecánica Computacional**, v. 33, p. 71-79, 2014.

BOURNET, P. E.; BOULARD, T.. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 74, p. 195–217, 2010.

BOWER, J.. **Understanding ventilation: How to design, select and install residential ventilation systems**. [S.l.] The Healthy House Institute, 1995.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M.. Numerical simulation of wind action on a long-span bridge deck. **J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.**, [S.l.], v. 25, p. 352-363, 2003.

BRAUN, A. L.. **Simulação numérica na engenharia do vento incluindo efeitos de interação fluido-estrutura**. 2007. Tese de Doutorado (PPGEC) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M.. Aerodynamic and aeroelastic analysis of bundled cables by numerical simulation. **J. of Sound and Vib.**, [S.l.], v. 45, p. 51-73, 2005.

BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M.. Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation. **Computers and Structures**, [S.l.], v. 87, p. 564-581, 2009.

BRUNETTI, F.. **Mecânica dos fluidos**. 2 ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CABRAL, D. N.; BONO, G.; BONO, G. F. F.. Estudo paramétrico de dispositivos de controle passivo de vibrações induzidas por vórtices. **Mecánica Computacional**, Salta, Argentina, v. 31, p. 69-84, 2012.

CASTRO, I. P.; ROBINS, A. G.. The flow around a surface-mounted cube in uniform, turbulent streams. **Journal of Fluid Mechanics**. Cambridge: Cambridge University, v. 79, p. 307-335, 1997.

CHORIN, A. J.. A numerical method for solving incompressible viscous flow problems. **J. Comput. Phys.**, [S.l.], v. 2, p. 12-26, 1967.

CHRISTON, M. A.. A domain-decomposition message-passing approach to transient viscous incompressible flow using explicit time integration. **Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng.**, [S.l.], v. 148, p. 329-352, 1997.

DONEA, J.. A Taylor-Galerkin method for convective transport problems. **Int. Journal for Num. Methods in Eng.**, [S.l.], v. 20, p. 101-119, 1984.

DONEA, J.; GIULIANI, S.; LAVAL, H.; QUARTAPELLE, L.. Time-accurate solution of advection-diffusion problems by finite elements. **Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng.**, [S.l.], v. 45, p. 123-145, 1984.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLUNZEN, H.; CARISSIMO, B.. **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Reino Unido: COST Office, 2007.

GCOE PROGRAM – Global Centers of Excellence Program, Tokyo Polytechnic University. Wind Effects on Buildings and Urban Environment. Disponível em: < http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html> Acesso em: 02 de abr. de 2016.

GHIAUS, C.; ALLARD, F.. **Natural ventilation in urban areas: potential assessment and optimal façade design handbook**. [S.I.] URBVENT, 2004.

JIANG, Y.; ALEXANDER, D.; JENKINS, ARTHUR, R.; CHEN, Q.. Natural ventilation in buildings: measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S.I.], v. 91, p. 331-353, 2003.

KAWAHARA, M.; HIRANO, H.. A finite element method for high Reynolds number viscous fluid flow using two step explicit scheme. **Int. Journal for Num. Methods in Fluids**, [S.I.], v. 3, p. 137-163, 1983.

LAVAL, H.; QUARTAPELLE, L.. A fractional-step Taylor-Galerkin method for unsteady incompressible flows. **Int. Journal for Num. Methods in Fluids**, [S.I.], v. 11, p. 501-513, 1990.

LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S.. Influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. Porto Alegre: **Ambiente Construído**, v.3, n. 2, p. 57-67, 2003.

LÖHNER, R.; MORGAN, K.; ZIENKIEWICZ, O. C.. The solution of non-linear hyperbolic equation systems by the finite element method. **Int. Journal for Num. Methods in Fluids**, [S.I.], v. 4, p. 1043-1063, 1984.

MARTINUZZI, R.; TROPEA, C.. The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow. **Journal of Fluids Engineering**, [S.I.], v. 115, p. 85-92, 1993.

MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A.. 3D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-e model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S.I.], v.31, p. 283-303, 1988.

PERÉN, J. I.; HOOFF, T. V.; LEITE, B. C. C.; BLOCKEN, B.. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**. [S.I.], v. 85, p. 263-276, 2015.

PETRY, A. P.; AWRUCH, A. M.. Large eddy simulation of three-dimensional turbulent flows by the finite element method. **J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.**, [S.I.], v. 28, p. 352-363, 2006.

PROJETEEEE – Projetando Edifícios Energicamente Eficientes, PE - Caruaru > Estratégias. Disponível em: < <http://150.162.76.139/estrategias/>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P.; SHORT, L. J.. Wind pressures on a 6m cube. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S.l.], v. 89, p. 1553-1564, 2001.

RUPP, R. F.; GHISI, E.. **Potencial de economia de energia elétrica através do uso da luz natural e da ventilação híbrida em edifícios comerciais em Florianópolis**. Porto Alegre: Ambiente Construído, v. 13, n. 4, p. 75-86, 2013.

SELMIN, V.; DONEA, J.; QUARTAPELLE, L.. Finite element methods for nonlinear advection. **Comp. Methods in Appl. Mech. and Eng.**, [S.l.], v. 52, p. 817-845, 1985.

SMAGORINSKY, J.. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. **Month. Weather Rev.**, [S.l.], v. 91, p. 99-164, 1963.

SOUZA, H. A.; RODRIGUES, L. S.. Ventilação natural como estratégia para o conforto térmico em edificações. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, p. 189-194, 2012.

SOUZA, M. M.. **Solução das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis via Elementos Finitos**. 2013. 118 p. Tese (Mestrado em Matemática Aplicada) - Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TOMINAGA, Y.; MOCHIDA, A.; YOSHIE, R.; KATAOKA, H.; NOZU, T.; YOSHIKAWA, M.; SHIRASAWA, T.. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S.l.], v.96, p. 1749-1761, 2008.

TOMINAGA, Y.; AKABAYASHI, S.; KITAHARA, T.; ARINAMI, Y.. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, [S.l.], v.84, p. 204-213, 2015.

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

TULAPURKARA, E. G.. Turbulence Models for the computation of flow past airplanes. **Prog. Aerospace Sciences**, [S.l.], v. 33, p. 71-165, 1997.

UEMATSU, Y.; ISYUMOV, N.. Wind pressures acting on low-rise buildings. **J. Wind Eng. Industrial Aerodynamics**, [S.l.], v. 82, p. 1-25, 1999.