



NIXON CESAR DE ANDRADE

**ESTUDO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
EDIFICAÇÕES COM CAPTADORES DE VENTO
MULTIDIRECIONAIS POR MEIO DE ENSAIOS EM
TÚNEL DE VENTO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS**

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

NIXON CESAR DE ANDRADE

**ESTUDO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM
EDIFICAÇÕES COM CAPTADORES DE VENTO
MULTIDIRECIONAIS POR MEIO DE ENSAIOS EM
TÚNEL DE VENTO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS**

Orientadora: Prof^a Dr^a Lucila Chebel Labaki

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração Arquitetura e Construção.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO NIXON CESAR DE ANDRADE E
ORIENTADO PELA PROFA. DRA. LUCILA CHEBEL LABAKI.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR(A)

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

An24e Andrade, Nixon Cesar de, 1976-
Estudo da ventilação natural em edificações com captadores de vento multidirecionais por meio de ensaios em túnel de vento e simulações computacionais / Nixon Cesar de Andrade. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Lucila Chebel Labaki.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Ventilação natural. 2. Arquitetura e clima. 3. Túneis aerodinâmicos - Balanças. 4. Simulação computacional. I. Labaki, Lucila Chebel, 1943-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of natural ventilation in buildings with multidirectional wind catchers through wind tunnel testing and computer simulations

Palavras-chave em inglês:

Natural ventilation
Architecture and climate
Wind tunnel balances
Computational simulation

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Lucila Chebel Labaki [Orientador]
Doris Catharine Cornélie Knatz Kowaltowski
Paulo Vatauvuk
Henor Artur de Souza

Leonardo Salazar Bittencourt

Data de defesa: 16-12-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

ESTUDO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES COM
CAPTADORES DE VENTO MULTIDIRECIONAIS POR MEIO DE
ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO E SIMULAÇÕES
COMPUTACIONAIS

NIXON CESAR DE ANDRADE

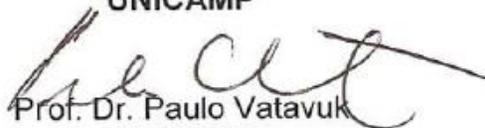
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof^a. Dr^a. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientadora/UNICAMP



Prof^a. Dr^a. Doris Catharine Cornelie Knatz Kowaltowski
UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Vataavuk
UNICAMP



Prof. Dr. Henor Artur de Souza
UFOP



Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt
UFAL

Campinas, 16 de dezembro de 2013

RESUMO

A ventilação natural é uma das estratégias mais adequadas para o resfriamento passivo dos edifícios e para a manutenção da qualidade do ar. Uma das alternativas existentes para se alcançar tal proposição é a utilização de torres de vento situadas acima do nível da cobertura, as quais podem funcionar como captadores ou extratores de ar. Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar quatro tipos de torres, atuando como captadores: a unidirecional, com uma abertura para a entrada de vento, em locais onde o vento se movimenta predominantemente em uma direção; a tetradirecional, com quatro aberturas; a octodirecional, com oito aberturas e a dodecadirecional, com doze aberturas; em locais em que o vento age em várias direções. Para alcançar o objetivo utilizaram-se ensaios em túnel de vento e simulações no software CFX[®], os quais permitiram estudar as características técnicas das torres analisadas e seus efeitos sobre a ventilação interna do ambiente, bem como contribuir para a difusão desse sistema de ventilação no Brasil. O desenvolvimento do trabalho foi dividido nas seguintes etapas: definição das geometrias das torres; definição, construção e instrumentação das maquetes; definição dos ângulos de incidência do vento; ensaios no túnel de vento e simulações no software CFX[®]: velocidade e pressão. Os resultados obtidos a partir de uma série de experimentos e simulações computacionais permitiram a análise e comparação dos diversos projetos propostos, auxiliando, portanto, na determinação das configurações mais adequadas, além da verificação da compatibilidade entre os dois tipos de estudo, concluindo que as torres octodirecional e dodecadirecional são as mais eficientes, pois proporcionam maiores valores de velocidade do ar interno na maioria das posições consideradas. Desta forma, utilizando o túnel de vento e o CFX[®], as análises possibilitaram desenvolver melhorias para os ambientes avaliados, no que se refere ao desempenho da ventilação. Isso proporcionará melhores taxas de conforto aos usuários da edificação, considerando todas as aberturas para permitir o fluxo do vento em qualquer situação. Ademais, podem-se verificar as distribuições das aberturas de entrada e saída mais adequadas para captação e distribuição do vento no interior dos ambientes, proporcionando melhores condições de conforto térmico.

Palavras-chave: Captador de vento, Torre de vento, Túnel de vento, Ventilação natural, Arquitetura bioclimática, CFX[®].

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the most appropriate strategies for passive cooling of buildings and the maintenance of air quality. One of the alternatives for achieving such proposal is the use of wind towers above the level of the roof, which can function as air catchers or extractors. This research aims to evaluate four types of towers, acting as air catchers: unidirectional, with an opening for the entrance of the wind, in locations where the wind moves predominantly in one direction, the tetradirectional, with four openings, the octodirectional, with eight openings and dodecadirectional, with twelve openings, in locations where the wind moves in various directions. To achieve the goal, tests in wind tunnel and simulations in CFX[®] software were performed, which allowed the study of the technical characteristics of the analyzed towers and their effects on the indoors ventilation, as well as the contribution to the spread of this ventilation system in Brazil. The methodology was divided into the following steps: the definition of the geometry of the towers; definition, construction and instrumentation of the models; definition of the angles of the incidence of the wind; wind tunnel tests and simulations in CFX[®] software: speed and pressure. The obtained results from a series of experimental and computational simulations allowed the analysis and comparison of the various proposed design configurations, helping, therefore, in determining the most appropriate settings, besides the verification of compatibility between the two types of study, concluding that the octodirectional and dodecadirectional towers are the most efficient ones, as they provide higher rate of indoor air speed in most considered positions. Thus, using the wind tunnel and CFX[®], the analysis allowed the development of enhancements to the analyzed environments, concerning the performance of the ventilation. This will provide better comfort rates to the users of the building, considering all openings to allow the wind flow in any situation. Furthermore, the most suitable distribution of inlet and outlet openings for the catchment and distribution of the wind within the environments may be verified, providing better conditions of thermal comfort.

Keywords: Wind catcher, Wind tower, Wind tunnel, Natural ventilation, Bioclimatic architecture, CFX[®].

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. Hipótese.....	03
1.2. Objetivos.....	03
1.2.1. Geral.....	03
1.2.2. Específicos.....	03
1.3. Motivação.....	04
1.4. Estrutura do Trabalho.....	04
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1. Torre de Vento.....	05
2.1.1. Definição.....	05
2.1.2. Histórico.....	05
2.1.3. Tipologia.....	06
2.1.4. Classificação.....	07
2.1.5. Mecanismo.....	08
2.1.6. Vantagens, Limitações e Recomendações das Torres de Vento	09
2.1.7. Torres de Vento e Conforto Térmico.....	09
2.2. Túnel de Vento.....	31
2.2.1. Definição.....	31
2.2.2. Pressão de velocidade.....	32
2.2.3. Ensaios em Túnel de Vento e Conforto Térmico.....	34
2.3. Ensaio de Torre de Vento em Túnel de Vento.....	65
2.4. Simulações em CFD: Software CFX®	71
2.4.1. CFD (Computational Fluid Dynamics).....	71
2.4.2. CFD e Conforto Térmico.....	72
2.5. Torre de Vento: Ensaio em Túnel de Vento e Simulação em Software CFX®	85
3. METODOLOGIA.....	89
3.1. Definição das geometrias das torres.....	89
3.2. Avaliação segundo o ângulo de incidência.....	89
3.3. Ensaios no túnel de vento.....	89
3.3.1. Túnel de Vento.....	89
3.3.2. Definição das maquetes.....	91
3.3.3. Construção das maquetes.....	94
3.3.4. Ensaios no túnel de vento	96
a) Ensaios de velocidade.....	96
b) Ensaios de pressão.....	102

3.4. Simulações no software CFX®	103
3.4.1. Descrição da geometria.....	104
3.4.2. Definição das Parts.....	105
3.4.3. Determinação da malha.....	106
3.4.4. CFX –Pre®: Condições Iniciais e de Contorno.....	108
3.4.5. Controle de solução.....	112
3.4.6. CFX – Solver®	112
3.4.7. CFX – Post® (Post-Processing).....	113
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	117
4.1. Ensaio no túnel de vento.....	117
a) Ensaio de velocidade.....	117
b) Ensaio de pressão.....	121
c) Relação entre os valores do coeficiente de pressão e de velocidade na ventilação da edificação.....	127
4.2. Simulações no software CFX®	132
a) Simulações de velocidade.....	132
b) Simulações de pressão.....	182
c) Relação entre os valores do coeficiente de pressão e de velocidade na ventilação da edificação.....	198
4.3. Comparação e diferenças entre os resultados dos ensaios no túnel de vento e das simulações no software CFX®	202
a) Velocidade.....	202
b) Coeficiente de pressão.....	211
5. CONCLUSÕES.....	221
5.1. Ensaio no túnel de vento.....	221
5.2. Simulações no software CFX®	222
5.3. Ensaio no túnel de vento e Simulações no software CFX®	222
5.4. Sugestões para pesquisas futuras.....	223
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	225
APÊNDICES.....	239
Apêndice A.....	239
Apêndice B.....	246
Apêndice C.....	253
Apêndice D.....	261
ANEXO.....	284

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais,
pelo incentivo ao estudo e
pela orientação na vida*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, pelo apoio, confiança, dedicação e entusiasmo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Às professoras Lucila Chebel Labaki e Rosana Maria Caram, pela orientação, atenção e ensinamentos durante a realização desta pesquisa.

Aos professores Paulo Vatauvuk e Doris Catharine Cornelie Knatz Kowaltowski que aceitaram a participação na banca do exame de qualificação.

Aos professores Paulo Vatauvuk, Doris Catharine Cornelie Knatz Kowaltowski, Henor Artur de Souza e Leonardo Salazar Bittencourt que aceitaram a participação na banca de defesa da tese.

Ao pesquisador Edson Matsumoto, pelo auxílio nos ensaios do túnel de vento.

Ao professor Paulo Celso Greco Junior – EESC/USP, e, à doutoranda Marieli Azoia Lukiantchuki – IAU/USP, pelo suporte técnico nas simulações com o software CFX®.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

Aos técnicos e pesquisadores do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – LACAF/FEC/UNICAMP, pelo apoio e convivência durante o tempo de doutorado.

Aos técnicos e pesquisadores do Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo – LCC/IAU/USP, especialmente aos do Laboratório de Conforto Ambiental, pelo apoio e convivência durante o tempo de simulações no software CFX®.

Aos demais, amigos e familiares, que de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural é uma das estratégias mais adequadas para o resfriamento passivo dos edifícios, principalmente em climas quente e úmido, e para a manutenção da qualidade do ar interno. A massa de ar no interior dos ambientes deve ser continuamente retirada e substituída por ar fresco de uma fonte externa e limpa para manter a concentração de contaminantes em níveis satisfatórios, além de ser utilizada no resfriamento da massa edificada e/ou direcionada diretamente sobre os usuários com o objetivo de tornar os ambientes termicamente confortáveis.

Rivero (1985) afirma que a ventilação natural pode ser térmica ou dinâmica. A primeira se baseia na diferença entre as temperaturas do ar interior e exterior que origina pressões distintas, provocando deslocamento da massa de ar da zona de maior para a de menor pressão. Quando nessas condições existem duas aberturas em diferentes alturas, se estabelece uma circulação de ar de uma até a outra, denominada efeito chaminé, por ser este precisamente o princípio que rege seu funcionamento. A segunda é causada pelas pressões e depressões que se geram nos volumes como consequência da ação mecânica do vento. Dá origem a duas maneiras de ventilar: uma delas é mediante planos móveis (janelas), cuja localização, forma e área permitirão cumprir com os objetivos perseguidos; a outra é por exaustores fixos ou rotatórios colocados nas coberturas dos edifícios, que aproveitam o efeito do vento para produzir uma depressão ou efeito de sucção que promove a saída do ar por estes aparelhos.

Segundo Araújo e Cunha (2010), o comportamento da ventilação natural pode ser estimado por meio de ferramentas de predição, cujo grau de incerteza varia de acordo com a complexidade do fenômeno ou do projeto. A utilização destas ferramentas, isoladas ou em conjunto, ao longo do processo projetual aumenta significativamente a possibilidade de acerto nas decisões tomadas em busca do condicionamento passivo eficaz. Apesar da notória importância, tais ferramentas nem sempre são consideradas durante o desenvolvimento do projeto e o sucesso no uso de estratégias que promovam a ventilação natural dependem da experiência do projetista. Definindo a estratégia mais

adequada e ajustando-a de acordo com o grau de aprofundamento de cada fase do processo projetual, é possível potencializar o uso da ventilação natural na edificação.

Uma das alternativas existentes para se alcançar tal proposição é a utilização de torres de vento situadas acima do nível da cobertura, as quais podem funcionar como captadores ou extratores de ar. Estudos qualitativos recentes, sobre o padrão de circulação do vento no interior da tipologia examinada, demonstraram que tais dispositivos podem ser eficientes como solução arquitetônica na promoção da renovação do ar e do conforto higrotérmico.

Para Lôbo e Bittencourt (2003), as características do clima brasileiro apontam o aproveitamento da ventilação natural como um dos instrumentos mais eficientes na obtenção de conforto térmico nos períodos de calor. Entretanto, no Brasil, a estratégia das torres de vento não é empregada, provavelmente devido ao pouco conhecimento científico dessa estratégia por parte dos projetistas.

Martins *et al* (2009) afirmam que em grande parte da região do Brasil, onde predomina o clima quente e úmido, as taxas de velocidade do ar são bastante altas e passíveis de serem amplamente utilizadas para proporcionar conforto por meio do uso de elementos de captação do vento em edificações. Apesar de ainda pouco empregadas, as torres de vento oferecem um eficiente aproveitamento desse recurso.

A proposta desse trabalho é avaliar a interação do escoamento do vento com a torre, atuando como captador, e a edificação, cujas ferramentas utilizadas são o túnel de vento e o software CFX[®], tanto na medição da velocidade do ar como na aferição dos coeficientes de pressão. Os resultados obtidos a partir de uma série de ensaios experimentais e simulações computacionais permitem a análise e comparação das diversas configurações de projeto propostas, auxiliando, portanto, na determinação das configurações mais adequadas, bem como verificar a compatibilidade entre os dois métodos.

Desta forma, utilizando o túnel de vento e o software CFX[®], os ambientes avaliados poderão desenvolver melhorias no desempenho da ventilação, satisfazendo os usuários da edificação, considerando móveis as aberturas inferiores da torre para permitir o fluxo do vento em qualquer situação. Ademais, podem-se verificar as distribuições das aberturas de entrada e saída mais adequadas para captação e distribuição do vento no interior dos ambientes, proporcionando melhor condição de conforto térmico.

1.1. Hipótese

A eficiência da ventilação de uma edificação com torre de vento, funcionando como captador, está relacionada ao número de aberturas de entrada do ar da torre.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a relação entre o número de aberturas de captação das torres de vento e a ventilação de um ambiente utilizando ensaios em túnel de vento e simulações computacionais.

1.2.2. Específicos

Estudar as características técnicas das torres analisadas e seus efeitos sobre a ventilação interna do ambiente;

Identificar as velocidades e pressões do vento que interferem na ventilação interna das edificações com as torres de vento analisadas;

Analisar a ventilação natural proporcionada pelas diferentes torres de vento através de simulações com o software CFX[®] e comparar com os resultados obtidos dos ensaios em túnel de vento;

Contribuir para a difusão desse sistema de ventilação em locais de clima quente e úmido como o Brasil.

1.3. Motivação

As torres de vento, desde que posicionadas corretamente para a captação dos ventos dominantes, podem contribuir para um aumento significativo da ventilação natural das edificações, cujos benefícios proporcionados são o conforto térmico e a economia de energia elétrica.

1.4. Estrutura do trabalho

Esse trabalho abrange além deste, mais quatro capítulos. No segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, são descritos histórico, definições, detalhes de projeto e aplicações das torres de vento, bem como os fundamentos teóricos dos métodos aplicados na pesquisa. No terceiro capítulo, Metodologia, são definidas as características experimentais desse estudo, assim como os métodos e equipamentos utilizados. No quarto capítulo, Resultados e Discussão, são apresentados os dados e análises comparativas entre as torres pesquisadas e os métodos utilizados. O quinto capítulo, Conclusões, apresenta uma síntese das análises do capítulo anterior e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

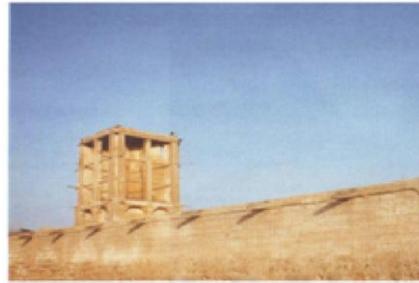
2.1. Torre de Vento

2.1.1. Definição

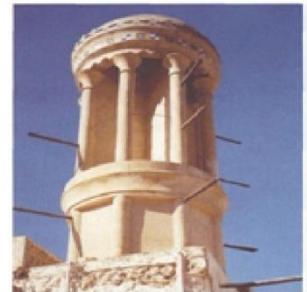
Segundo Bahadori (1994), as torres funcionando como captadores de vento ou “Baud-Geers” (em persa) consistem em torres projetadas para “capturar” o vento, que passa acima da cobertura das edificações, e redirecioná-lo para os espaços interiores de uma edificação (figura 2.1).



Edificação com torre de vento em Dubai



Casa com torre de vento em Umm al-Qaiwain



Torre de vento circular em Sharjah

Figura 2.1: Exemplos de construções com torre de vento nos Emirados Árabes Unidos

Fonte: HAWKER, 2001

2.1.2. Histórico

Para El Shorbagy (2010) a torre de vento é um elemento arquitetônico tradicional da Pérsia, utilizado durante muitos séculos, mas há evidências de que a ideia dessa construção remonta aos períodos faraônicos, pois exemplos podem ser encontrados nas casas dos faraós Tal Al-Amarna e Neb-Amun, descrita a partir de uma pintura em seu túmulo (Dinastia XIX, 1300 a.C), mostrando um captador de vento com duas aberturas, uma de frente para captar o ar frio e a outra para evacuar o ar quente (figura 2.2).

As torres de vento, segundo A'zami (2005), são utilizadas no Irã desde os primórdios de sua história e podem ser consideradas como exemplos específicos de energia limpa (figura 2.3), sendo encontradas tanto em regiões quentes e secas (Yazd) como em quentes e úmidas (Lenghe).

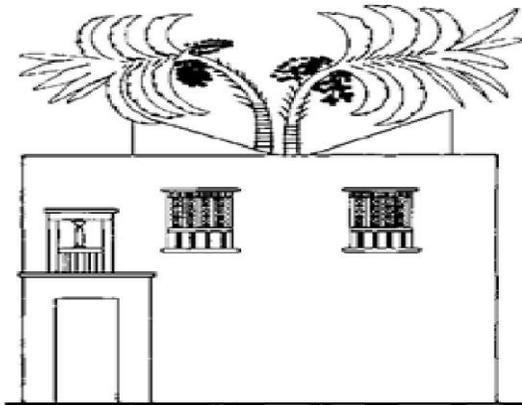


Figura 2.2: Casa do Faraó Neb-Amun

Fonte: EL SHORBAGY, 2010

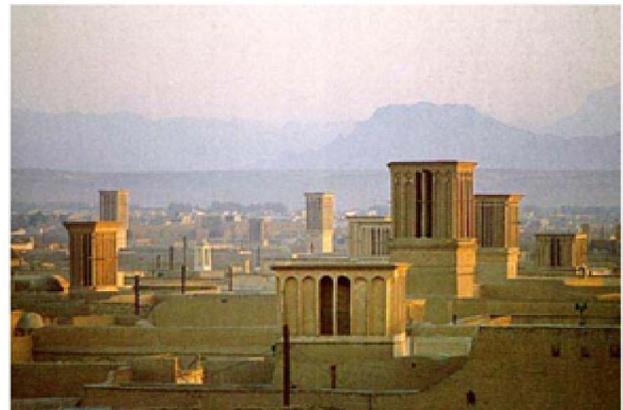


Figura 2.3: Torres de Vento no Irã

Fonte: EL SHORBAGY, 2010

2.1.3. Tipologia

Segundo Van Lengen (2004), as partes que compõem uma torre de vento são (figura 2.4):

Base: é formada pelas paredes externas inferiores, sendo que para torres altas elas são mais grossas para apoiar o peso das paredes superiores.

Paredes Cruzadas: a base das paredes cruzadas apoia-se nas paredes externas e são de vigas de madeira ou de concreto. As paredes cruzadas são levantadas sobre essa base.

Aberturas: são formadas a partir do levantamento das paredes externas superiores.

Teto: ao final a torre recebe uma cobertura horizontal, que pode ser de laje de concreto ou uma abóbada.

Quanto à altura, segundo Montazeri e Azizian (2008), as torres de vento podem ter de 5 a 33 metros de altura, a qual varia de acordo com a região em que a edificação está inserida e o tipo de ventilação desejada, pois torres com grandes alturas captam ventos com maiores velocidades, sendo eficiente também na redução de areia e poeira típicos do clima seco, no qual o ar contém menos partículas ao nível da cobertura, e, torres baixas são construídas em locais de clima úmido.

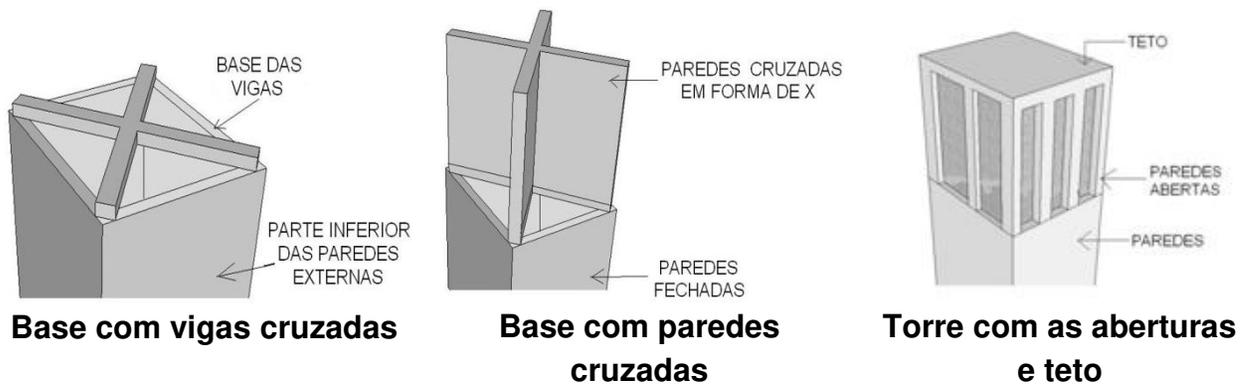


Figura 2.4: Componentes de uma torre de vento

Fonte: Adaptado de VAN LENGEN, 2004

2.1.4. Classificação

De acordo com Ghaemmaghami e Mahmoudi (2005), as torres de vento são classificadas dependendo do número de aberturas voltadas ao vento, sendo as mais usuais: unidirecional (pouco utilizada por captar vento em uma única direção), bidirecional (utilizada em casas de pequenas dimensões), tetradirecional (mais utilizadas por captar vento em várias direções) e octodirecional (utilizadas onde há caixas d'água sobre a torre) (figura 2.5).

Em consideração ao número de aberturas, Bahadori, Mazidi e Dehghani (2008), afirmam que o ar ao entrar em uma torre com mais de uma abertura tem uma parte perdida pelas outras aberturas, enquanto que na torre unidirecional, apesar de pouco utilizada, todo o ar é aproveitado para ventilar a edificação.

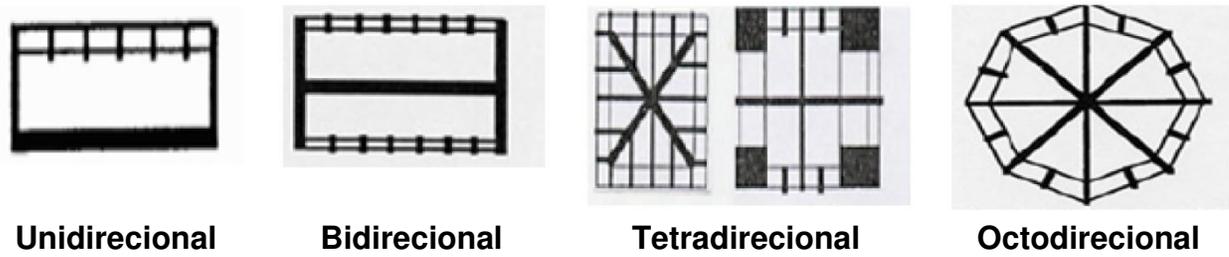


Figura 2.5: Classificação das torres de vento em relação às aberturas

Fonte: GHAEMMAGHAMI; MAHMOUDI, 2005

2.1.5. Mecanismo

Segundo Maleki e Shabestari (2010), as torres de vento funcionam sob dois mecanismos:

Diferenças de pressão: é baseado na captura de ar fresco para dentro da edificação e envia o ar quente e poluído para o exterior, pois existe uma associação da pressão positiva e da pressão negativa em locais com diferentes alturas (figura 2.6).

Diferenças de temperatura: enquanto uma face está voltada ao sol, a outra estará forçosamente à sombra, e, o ar fresco, que se encontra junto da fachada à sombra, atravessa o espaço em direção da fachada ao sol e mantém uma temperatura mais elevada. O ar quente, mais leve no interior, é então empurrado e renovado pelo ar fresco, mais pesado, proveniente da fachada à sombra. Para um arrefecimento passivo eficiente deve-se, portanto, aproveitar as amplitudes térmicas diárias, privilegiando os períodos mais frescos do dia e da noite (figura 2.6).

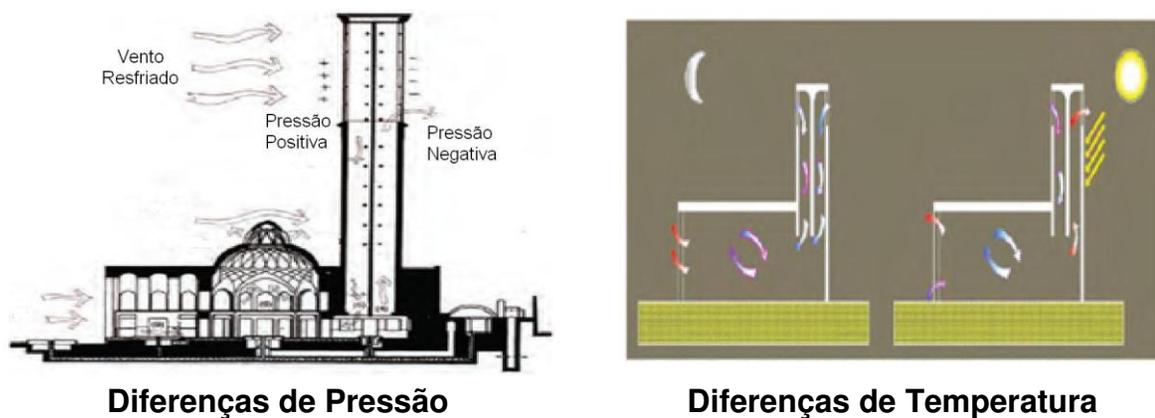


Figura 2.6: Mecanismos das torres de vento

Fonte: Adaptado de MALEKI; SHABESTARI, 2010

2.1.6. Vantagens, Limitações e Recomendações das Torres de Vento

As principais vantagens, limitações e recomendações das torres de vento encontram-se descritas na tabela 2.1.

2.1.7. Torres de Vento e Conforto Térmico

Bansal *et al* (1991) avaliaram o desempenho térmico de uma edificação, de dois pavimentos, a qual possui torre de vento na caixa de escada para ventilar o ambiente interno (figura 2.7). Essa construção está localizada em Jodhpur, próximo ao grande deserto indiano Thar, caracterizado pelo verão severo e inverno calmo, cuja velocidade do vento varia entre 10 e 15 km/h, e, a pesquisa foi realizada por meio de cálculos envolvendo variáveis físicas e formulações de transferência de calor e série de Fourier. Após a análise dos dados numéricos verificaram que a diferença de temperatura entre o ar externo e interno à edificação chega a 8°C, e, a torre pode ser usada para manter a ventilação durante a noite, auxiliando no controle da umidade relativa e do conforto ambiental.

Tabela 2.1: Vantagens, Limitações e Recomendações das torres de vento

Vantagens	Limitações	Recomendações
<p># A construção é rápida, simples e flexível. Se não é possível ter aberturas no lado barlavento de uma construção urbana, uma nova torre pode ser construída ou uma chaminé existente pode ser usada em substituição a esse mecanismo, formando captador de vento na parte superior;</p> <p># A torre com aberturas adequadas em sua parte superior direciona o ar captado pelas divisórias (canais) nos espaços internos;</p> <p># Aberturas no lado do sota-vento da edificação promove a circulação e o resfriamento de espaços internos;</p> <p># Uma torre pode funcionar ao contrário, ou seja, como uma chaminé solar.</p>	<p># Poeira, insetos e pássaros podem entrar na torre de vento juntamente com o ar, e, para evitar esse problema, as torres atuais são equipadas com telas, sem prejudicar o funcionamento da torre. Além disso, as aberturas do topo da torre estão localizadas em função da direção do vento, em áreas onde ventos com e sem poeira sopram em diferentes direções.</p> <p># Por se tratar de construções antigas e do mundo oriental (na maioria dos casos), há uma certa resistência por parte dos arquitetos contemporâneos em adotar esse tipo de construção, principalmente nos países ocidentais.</p>	<p># A operação não deve ser interrompida durante a noite, pois é nesse período que as paredes são resfriadas havendo uma troca de calor;</p> <p># Não obstruir o fluxo de ar no interior da edificação (canais interiores da torre);</p> <p># Não obstruir as aberturas (janelas) superiores para não prejudicar o mecanismo;</p> <p># As aberturas no interior da edificação devem estar localizadas somente ao nível dos ocupantes.</p>

Fonte: Baseado em ASIMAKOPOULOS *et al*, 2001; SANTAMOURIS, 1998; ROSHAN, 2011

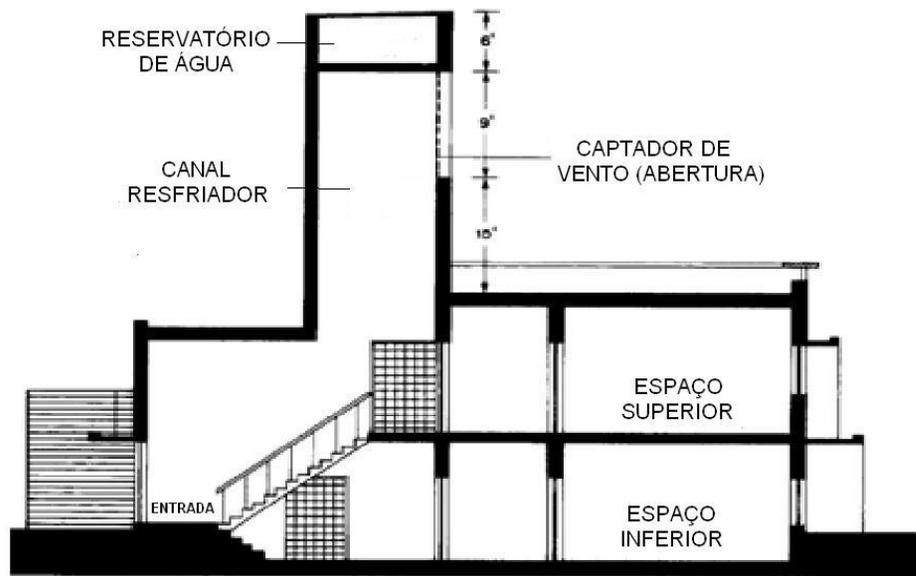


Figura 2.7: Esquema, em corte, da torre de vento na edificação de dois pavimentos

Fonte: Adaptado de BANSAL *et al*, 1991

Givoni (1998) desenvolveu e testou uma torre de resfriamento quando foi consultor em refrigeração de áreas de descanso ao ar livre para a EXPO 92 em Sevilha, Espanha. Esse sistema funciona quando gotas de água (com uma superfície muito grande) são pulverizadas verticalmente para baixo do alto de um eixo aberto, como um chuveiro, e a água que cai arrasta um grande volume de ar, sendo bombeada de volta para o pulverizador. A dinâmica da água caindo é assim transmitida para uma corrente de ar, criando um fluxo de ar para baixo do eixo inercial, e, a evaporação das gotas finas resfria a água, assim como o ar no eixo, para um nível próximo da temperatura ambiente. Uma ventoinha pode ser colocada acima do pulverizador, para complementar o fluxo de ar pelo efeito inercial do vento. A vantagem desse sistema é que pode ser utilizado qualquer tipo de água limpa, pois não houve diferença no desempenho de refrigeração do sistema quando testado com água doce ou salgada (figura 2.8).

Kultermann (1999) notou a presença de pátios e jardins, ao invés de corredores e rampas, para a circulação de pessoas na Universidade de Qatar, sendo mais apropriados ao clima quente e a tradicional cultura árabe. O projeto enfatiza a ventilação natural, comum à arquitetura tradicional da região. Foi utilizada a torre de

vento como inspiração, mas modernizando o princípio básico. O resultado foi um sucesso, pois integrou o elemento tradicional ao projeto contemporâneo, conectando passado e presente (figura 2.9).

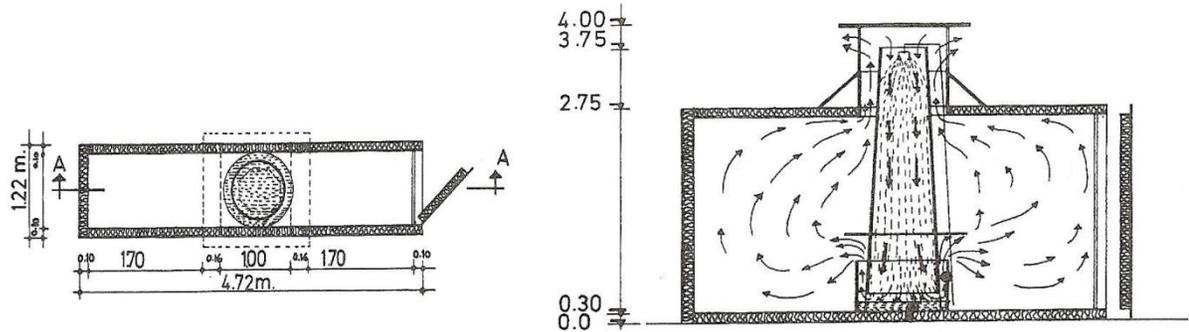


Figura 2.8: Esquema da torre de refrigeração: planta e corte

Fonte: Adaptado de GIVONI, 1994



Plano Geral



Detalhe dos Captadores

Figura 2.9: Universidade de Qatar, Doha

Fonte: KULTERMANN, 1999

Salmon (1999) observou que em casas com pátio interno, como no Iraque, os captadores de vento oferecem ventilação natural para as salas da edificação, que está ligada à sua base, onde os ocupantes normalmente descansam nas tardes de verão, pois como afirma Givoni (1976), em regiões de clima quente e seco, pátios e jardins internos são muitas vezes construídos para fins sociais e também como áreas de

dormir, pois a ventilação é aumentada ao máximo durante o dia, para eliminar o ar quente e o pó oriundo do meio externo. Entretanto, em alguns locais, as temperaturas são muito elevadas durante vários meses do ano e o verdadeiro conforto só pode ser conseguido por um sistema de refrigeração artificial. Ocasionalmente salas subterrâneas são projetadas pelo fato das temperaturas no verão serem menores do que em edifícios acima do solo, mas geralmente onde os edifícios estão sem meios mecânicos de refrigeração, os moradores têm que dormir nos telhados ou nos pátios (figura 2.10).



Figura 2.10: Edificação no Iraque com torre de vento e pátio externo

Fonte: <<http://simran090901.wordpress.com/>>

Segundo Koch-Nielsen (2002), o projeto da torre de vento depende principalmente das características da área em que ela será inserida, pois há estudos que avaliam a ventilação natural das edificações afirmando que as áreas das aberturas da entrada e saída do vento devem ser de 3% a 5% da área do piso da edificação servida por ela.

Badran (2003) estudou um novo critério para dimensionar a altura de torres de vento em Amman, Jordânia, e em outras regiões desérticas, como o Vale Ghor e Aqaba, onde o ar condicionado é muito utilizado. Após as medições no local concluiu que, para climas muito quentes, a altura da torre necessária para oferecer um fluxo de ar adequado pode ser menor que 9m, contrariando o projeto tradicional de torres com altura de 15m, sendo que uma torre com 4m de altura oferece o equivalente a 1t de refrigeração.

Lôbo e Bittencourt (2003) examinaram o potencial de melhoria do desempenho térmico de habitações populares localizadas em Maceió, cidade com clima quente e úmido, utilizando simulações tridimensionais utilizando o software Phoenics 3.2[®], cujos modelos estudados são compostos por duas tipologias construtivas, representando as unidades residenciais das edificações analisadas. Esses modelos foram simulados com suas configurações originais (sem captador de vento) e também com a incorporação de aberturas nas torres de caixa d'água, a fim de transformá-las em captadores do vento (figura 2.11).

Verificou-se que o uso de captadores de vento, posicionados adequadamente em relação aos ventos dominantes, pode gerar um aumento significativo da ventilação natural em edificações, chegando a dobrar a velocidade média do fluxo de ar em alguns ambientes, acelerando, assim, as trocas de calor entre o ar e o corpo humano (tabela 2.2). Concluíram que melhores resultados poderão ser obtidos em projetos arquitetônicos que considerem a implantação desses dispositivos, em conjunto com as demais aberturas, de forma a explorar ao máximo o potencial dos mesmos para promover uma adequada ventilação nos espaços projetados.

Sami (2003) realizou simulações de uma torre de vento associada a uma edificação, com o software Phoenics TMY2[®] (figura 2.12), utilizando os dados climáticos do Irã, sendo vento forte (16km/h) e brisa fraca (7km/h) com e sem sistema de resfriamento evaporativo. Após a análise dos resultados, concluiu que instalando um sistema de umidificação do ar no topo da torre auxilia na diminuição de altas temperaturas no ambiente interno da construção. Entretanto, há uma tendência em reduzir o fluxo de ar para a torre, pois o mecanismo de resfriamento forma uma barreira para a entrada do ar, mas isso é compensado com a troca de calor entre a água e o ar quente.

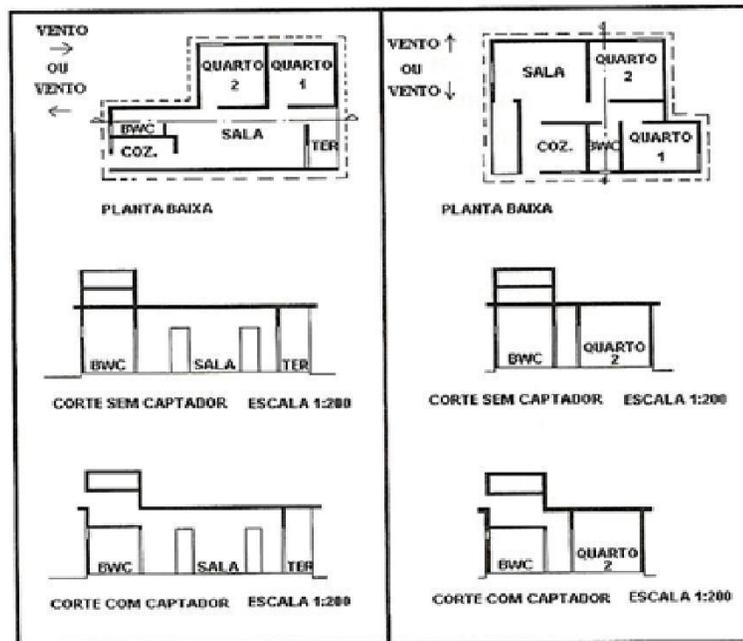


Figura 2.11: Planta baixa e cortes das unidades habitacionais dos conjuntos Salvador Lyra e Graciliano Ramos, respectivamente

Fonte: LÔBO; BITTENCOURT, 2003

Tabela 2.2: Resumo dos resultados das simulações, mostrando o incremento de ventilação natural média em relação à configuração original das unidades habitacionais (sem captador de vento)

Localização	Modelo	Captador	Sentido do vento	Incremento na sala	Incremento no quarto 1	Incremento no quarto 2
Conjunto Salvador Lyra	Modelo 1	Sem captador	Barlavento	-	-	-
	Modelo 2	Com captador	Barlavento	100%	20%	25%
	Modelo 3	Sem captador	Sotavento	-	-	-
	Modelo 4	Com captador	Sotavento	100%	15%	15%
Conjunto Graciliano Ramos	Modelo 5	Sem captador	Barlavento	-	-	-
	Modelo 6	Com captador	Barlavento	20%	90%	30%
	Modelo 7	Sem captador	Sotavento	-	-	-
	Modelo 8	Com captador	Sotavento	30%	0%	30%

Fonte: LÔBO; BITTENCOURT, 2003

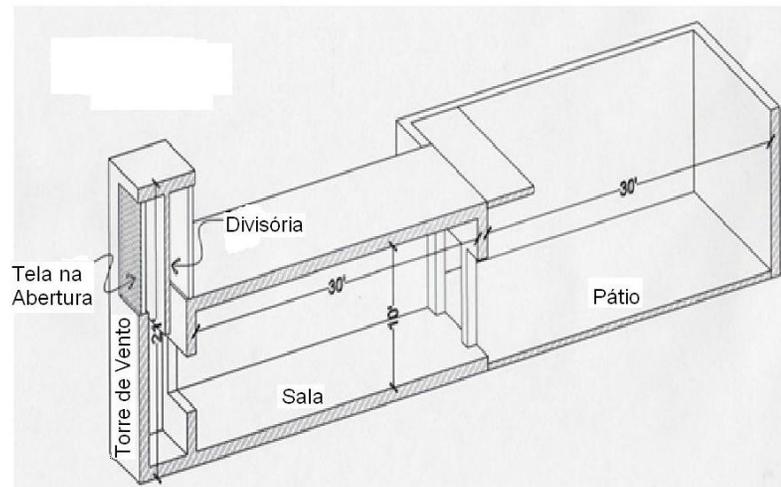


Figura 2.12: Modelo experimental testado no software Phoenics TMY2

Fonte: Adaptado de SAMI, 2003

Roaf (2005) afirma que com o aumento das temperaturas nas próximas décadas, as torres de vento deixarão de ventilar os ambientes por meio do sistema tradicional, sendo necessária a associação com terra, túnel ou porão para climatizá-los adequadamente. A casa Bagh-e Khan, em Yazd, Irã (figuras 2.13 e 2.14) é um exemplo de intensificação desse mecanismo de ventilação, pois possui espelho d'água e um reservatório sob o solo, resfriando o ar quente captado pela torre em até 20°C.



Figura 2.13: Casa Bagh-e Khan, em Yazd, servida por torre de vento e espelho d'água.

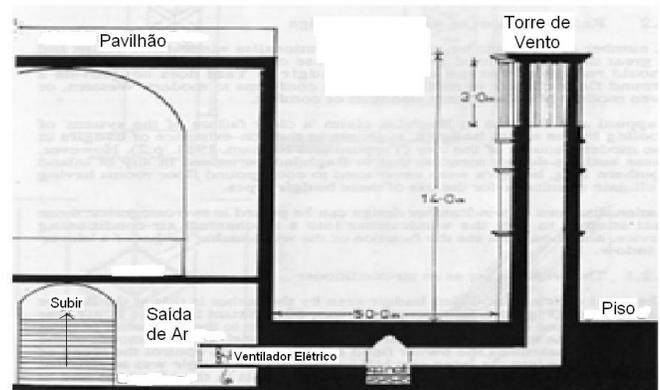


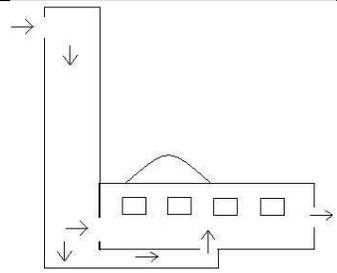
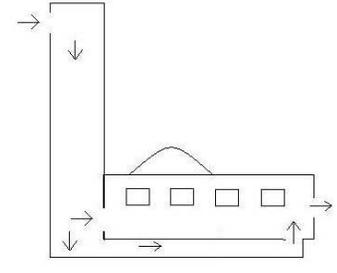
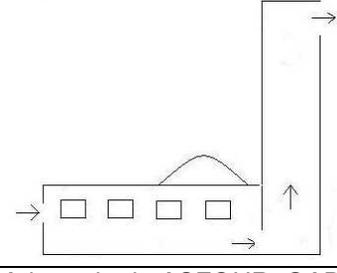
Figura 2.14: Corte da casa Bagh-e Khan mostrando a torre e o reservatório subterrâneo.

A casa Bagh-e Khan

Fonte: Adaptado de ROAF, 2005

Asfour e Gadi (2006) simularam utilizando o software Fluent 5.5[®] edificações com abóboda e cúpula, separadamente, nas quais foram acopladas torres de vento implementando três sistemas de torre (tabela 2.3). Após a análise dos resultados, concluíram que não há diferenças significativas na ventilação natural entre edificações com cúpula e abóboda, mas a presença de uma torre de vento aumenta a velocidade para a saída do ar, principalmente quando a torre é estabelecida com a configuração T2, na qual a velocidade do ar apresenta comportamento satisfatório.

Tabela 2.3: Sistemas de torre de vento

Código	Esquema	Descrição
T1		Captador com a abertura de entrada de ar voltada ao vento e condutor de ar ao centro através de um túnel subterrâneo
T2		Captador com a abertura de entrada de ar voltada ao vento e condutor de ar próximo à saída de ar através de um túnel subterrâneo
T3		Captador com a abertura de entrada de ar voltada contra o vento e sem ligação subterrânea (funciona como extrator)

Fonte: Adaptado de ASFOUR; GADI, 2006

Poshtiban, Khosroushahi e Poshtiban (2007) propuseram um sofisticado projeto de torre de vento intitulado “captador de vento inteligente” combinando o mecanismo tradicional com a tecnologia atual (figura 2.15). A ideia consiste em construir um captador ligado a uma bateria carregada por energia solar por meio de células voltaicas, e a um

mecanismo controlador Fuzzy[®], o qual possui um software que controlaria o captador obedecendo aos seguintes parâmetros: direção do vento, temperatura externa, interna e vazão de ar. Esse captador foi testado no software Matlab[®], e após a análise dos resultados concluíram que além de ser uma alternativa na economia de energia, pode-se complementá-lo com um aspersor d'água para umidificar o ambiente.

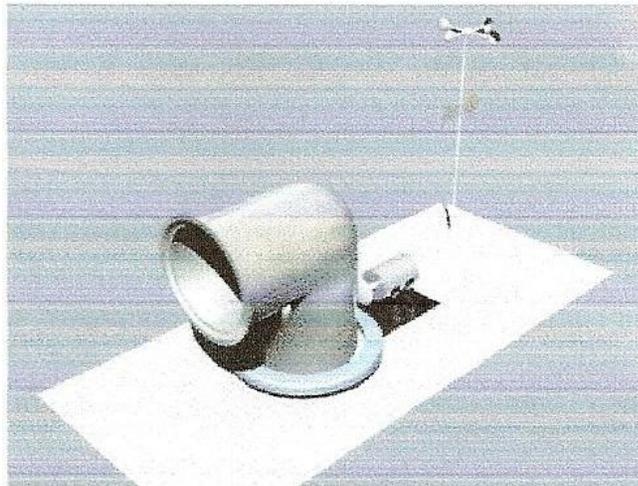


Figura 2.15: Captador de vento inteligente

Fonte: POSHTIBAN; KHOSROUSHAHI; POSHTIBAN, 2007

Rizk e Elghaffar (2007) relacionaram vários parâmetros que influenciam a ventilação natural de edificações, que possuem torre de vento, utilizando uma maquete com um *malqaf* (espécie de captador de vento utilizado na antiguidade), cujos modelo e dimensões são mostradas na figura 2.16.

Após a análise dos parâmetros considerados, foram relatados aqueles que apresentaram os melhores resultados, os quais se encontram resumidos na tabela 2.4.

Bahrami (2008) afirma que os captadores de vento podem funcionar como uma parte de sistemas de resfriamento evaporativo em combinação com um espelho d'água localizado no pátio ou no interior do edifício no espaço sob a torre. Além disso, quando não há vento ou a velocidade do vento é baixa, ocorre o efeito chaminé, bem como o resfriamento evaporativo por meio da água. Esta função depende de vários fatores

como o tipo, altura e tamanho da torre, velocidade do vento, número de cômodos e aberturas na edificação a que está conectada.

Para Edwards (2008) nos grandes edifícios de planta profunda, as torres de ventilação podem ser mais eficientes que as janelas laterais de ventilação. Os níveis de ventilação podem ser controlados mais facilmente e o sistema pode ser utilizado de forma integrada com outras estratégias de ventilação, como o efeito chaminé. Portanto, os ventos e o sol podem ser utilizados conjuntamente para reduzir a demanda de sistemas de ventilação mecânica. Neste sentido, as torres de ventilação tornaram-se populares entre os arquitetos ecológicos, como se pode verificar na cobertura de certas edificações, como a Portcullis House, em Londres, de *Michael Hopkins and Partners* (projetada em 1993 e inaugurada em 2001), que evidenciam a estratégia de ventilação natural (figura 2.17).

Mohammadzadeh e Haghparast (2008) apresentaram recomendações para melhorar, e até mesmo, estimular o uso de torre de vento em locais de clima quente, mostrando que esse dispositivo pode contribuir na refrigeração de ambientes internos utilizando a aplicação dos seguintes métodos: projeto das aberturas de entrada do ar voltadas contra o sentido do vento e as de saída próximas aos locais onde são desenvolvidas as atividades dos usuários; e, combinação de ventilação natural e mecânica, a qual utilizaria energia solar para o seu funcionamento.

Kalantar (2009) realizou um estudo em Yazd, no Irã, sobre o desempenho de uma torre de vento na ventilação de ambientes em região quente e seca, onde foram medidas temperaturas e velocidade do vento, interna e externamente à torre, sendo que em seu topo colocou-se um sistema de aspersão de água. Os valores medidos foram inseridos no software Fluent[®] para analisar o fluxo de ar ao longo da torre. Os resultados obtidos nas análises computacionais e experimentais mostraram que a adição de água sobre o ar seco tem considerável efeito nos parâmetros como temperatura, umidade relativa, velocidade do fluido e densidade, pois tal sistema reduz a temperatura de 10° a 15°C dependendo das dimensões da torre e condições ambientais. A carga de resfriamento é

suficiente para refrigerar um espaço de 700m² numa cidade como Yazd, permitindo concluir que o resfriamento evaporativo é muito eficaz em região quente e seca, onde a temperatura decresce consideravelmente se as torres fossem equipadas com sistema de aspersão d'água.

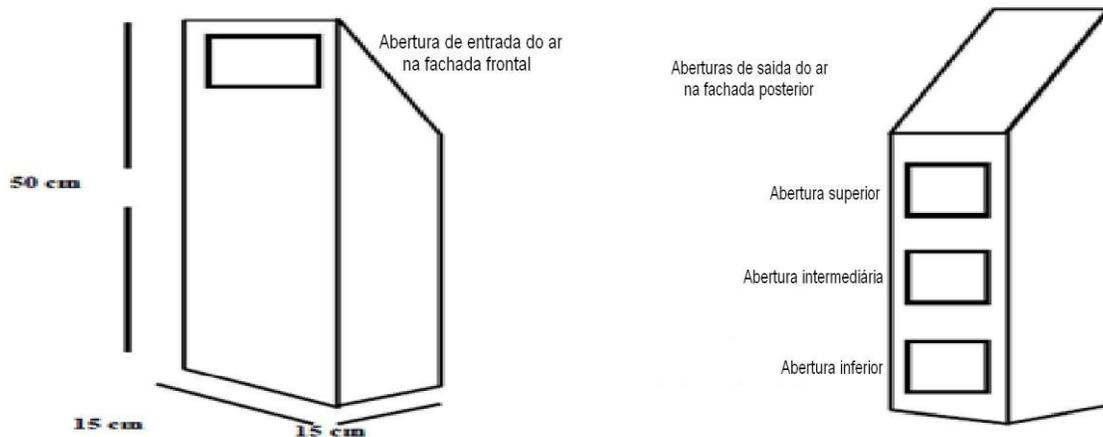


Figura 2.16: Maquete da edificação com *malqaf*: fachadas frontal (esquerda) e posterior (direita)

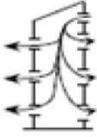
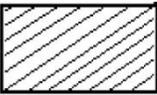
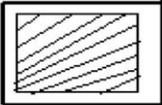
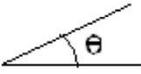
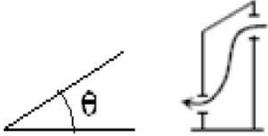
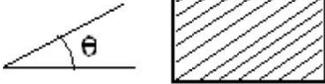
Fonte: Adaptado de RIZK; ELGHAFAR, 2007



Figura 2.17: Portcullis House, em Londres, de *Michael Hopkins and Partners*

Fonte: <<http://www.dailymail.co.uk/news/article-1236269/MPs-creche-400-000-cost-taxpayer.htm>>

Tabela 2.4: Resumo dos parâmetros analisados

Parâmetros	Esquema	Melhor Resultado
Direção do vento em relação à abertura de entrada de ar		Quando $\Theta=90^\circ$ a velocidade do vento é maior
Posição das aberturas de saída de ar		A velocidade do vento aumenta com as aberturas de saída localizadas na parede oposta à abertura de entrada
Altura das aberturas de saída de ar em relação ao piso		A velocidade do vento é maior nas aberturas de saída posicionadas próximo ao piso
Número de aberturas de saída de ar		Quanto menor o número de aberturas de saída de ar maior a velocidade do vento
Área das aberturas de saída de ar		A velocidade do vento aumenta à medida que aumenta a área da abertura de saída
Área da seção transversal da torre		Quanto menor a área da seção maior a velocidade do vento
Ângulo da cobertura		Com $\Theta=30^\circ$ a velocidade do vento é maior
Ângulo da cobertura e altura das aberturas de saída de ar		Com $\Theta=30^\circ$ a velocidade do vento é maior para qualquer altura, mas o maior valor foi para a abertura situada próxima ao piso
Ângulo da cobertura e área das aberturas de saída de ar		A velocidade do vento aumenta à medida que aumenta a área da abertura de saída independente do ângulo da cobertura

Fonte: Adaptado de RIZK; ELGHAFAR, 2007

Kang e Strand (2009) simularam no software EnergyPlus® uma edificação composta por uma torre de vento com sistema de resfriamento evaporativo localizado próximo à abertura superior (figura 2.18), considerando dados climáticos de três cidades norte-americanas: Phoenix (quente e seco), Dallas (quente e úmido) e Orlando (quente e úmido), obtendo-se então três resultados distintos para a mesma construção. Após a análise dos resultados concluíram que esse tipo de torre teve melhor comportamento em regiões de clima quente e seco com diferença de temperatura chegando a 17,7°C entre o ar externo e interno à edificação. Entretanto, o desempenho energético, a redução de emissão de poluentes e conforto térmico foram satisfatórios em todos os casos.

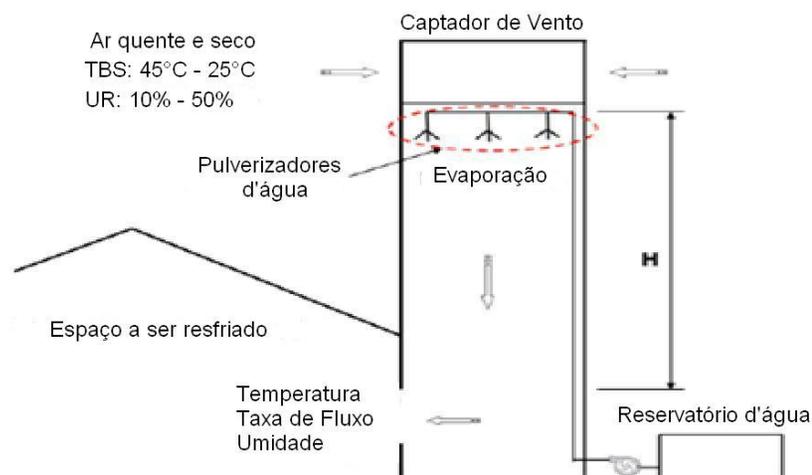


Figura 2.18: Esquema de torre de vento com resfriamento evaporativo

Fonte: Adaptado de KANG; STRAND, 2009

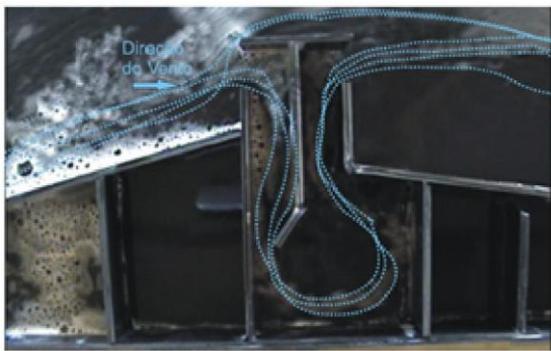
Martins *et al* (2009) examinaram o potencial do uso de torres de vento para introdução da ventilação natural em ambientes isolados em modelo de habitação geminada de meia-morada de diferentes tipologias (tabela 2.5). Os ensaios foram realizados em mesa d'água, os quais se mostraram bastante satisfatórios para a análise qualitativa sobre a admissão do ar no dispositivo, a circulação no interior do ambiente e a extração, em cada um dos casos de variações examinadas. Apesar das limitações da ferramenta, por permitir apenas a visualização bidimensional do espaço modelado, tal instrumento possibilitou a análise e avaliação de um conjunto de alternativas apresentadas para resolver o problema em questão, além de uma estimativa para as

dimensões do dispositivo arquitetônico. Verificou-se que o uso do defletor em quaisquer das situações examinadas se caracteriza como importante elemento a ser associado à torre de vento, possibilitando um melhor direcionamento do fluxo de ar nas alcovas (figura 2.19).

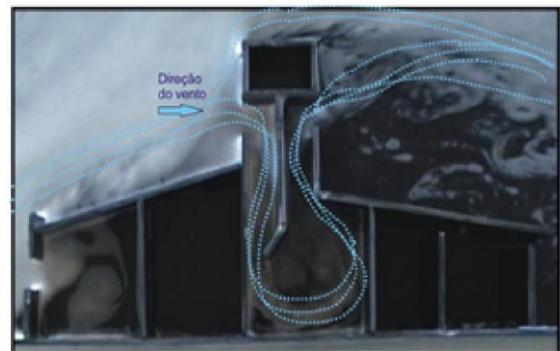
Tabela 2.5: Modelos dos dispositivos estudados

HABITAÇÃO GEMINADA	Sem torre de vento		a.
	Com torre de vento	Sem caixa d'água	Sem defletor
Com defletor			c.
Com caixa d'água		Sem defletor	d.
		Com defletor	e.

Fonte: MARTINS *et al*, 2009



Modelo sem caixa d'água e com defletor



Modelo com caixa d'água e defletor

Figura 2.19: Ensaio em mesa d'água dos melhores modelos estudados

Fonte: MARTINS *et al*, 2009

Saffari e Hosseinnia (2009) estudaram numericamente um novo projeto de torre de vento com diferentes parâmetros estruturais e condições ambientais, consistindo de cortinas em seu interior, as quais possuem dispositivos que as tornam permanentemente úmidas. As simulações foram realizadas com o software Foam[®]

baseado na Dinâmica do Flúido Computacional (CFD), adotando a abordagem Euleriana para a fase ar e a Lagrangiana para a fase água, sem excluir os efeitos da velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar (figura 2.20). Após a análise dos resultados verificaram que para cortinas com 10 metros de altura há uma diminuição de 12K da temperatura do ar interno e aumento de 22% na umidade relativa.

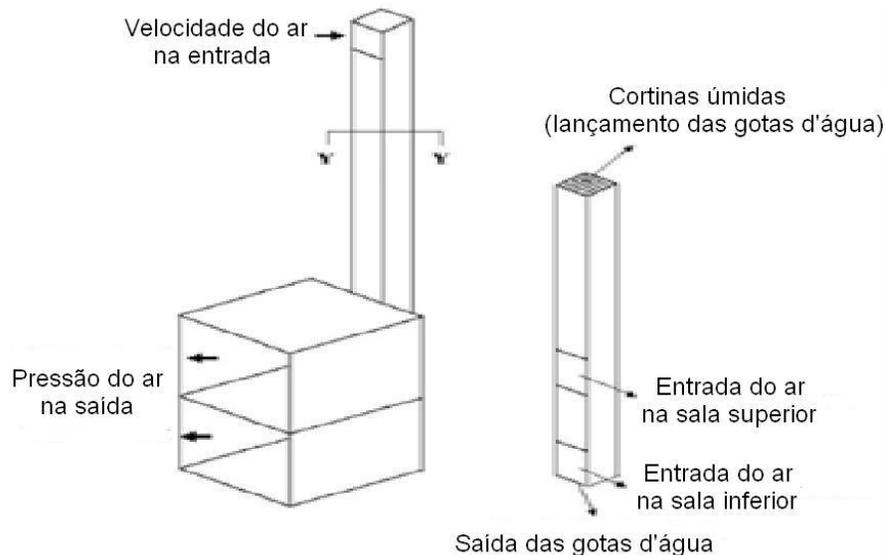


Figura 2.20: Modelo da edificação com torre de vento inserida no software Foam®

Fonte: Adaptado de SAFFARI; HOSSEINNIA, 2009

Zarandi (2009) percebeu que as edificações em Yazd, Irã, possuem torres de vento ligadas a pátios e jardins, onde o ar deve circular antes de entrar nas moradias, e, assim fez uma análise de três construções com diferentes posicionamentos dos captadores de vento (tabela 2.6) por meio de simulações utilizando o software Fluent®, cujos resultados encontram-se na tabela 2.7.

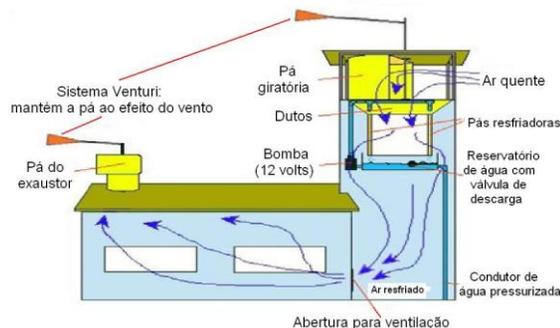
Pelos resultados foi concluído que o modelo 1 apresenta a melhor solução para amenizar altas temperaturas nessa região, e, combinando esses resultados com diferentes paredes internas da torre pode-se aperfeiçoar ainda mais a sua função.

El-Shorbagy (2010) relatou sobre a importância da torre de vento tradicional para melhorar o desempenho térmico e ampliar a sua aplicabilidade. Isto irá trazer novas oportunidades para a utilização deste antigo mecanismo de refrigeração passiva

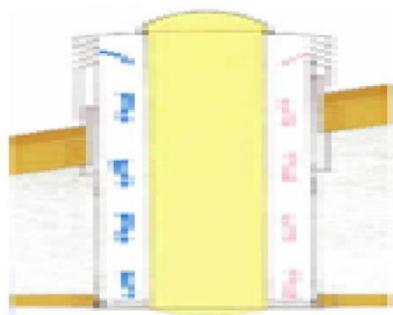
no mundo atual. Apesar da dificuldade dessa construção ser aceita por arquitetos contemporâneos, o crescimento pela procura de fontes de energia renováveis desperta a combinação entre o conhecimento tradicional e tecnologia avançada, pois a falta de desenvolvimento de modelos do mundo real é um dos fatores que atualmente inibem a ampla aplicação de captadores de vento. Atualmente, a existência de exemplos construídos em diferentes partes do mundo oferece um ponto de partida para a pesquisa, necessitando desenvolver diretrizes práticas para o projeto de torres de vento para todos os tipos de edifícios (figura 2.21).



Zion National Park, Springdale, USA



Resfriamento Passivo na Torre de Vento



Ventilação e iluminação natural

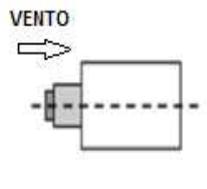
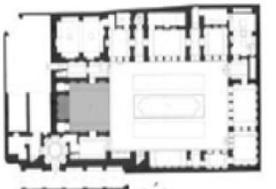
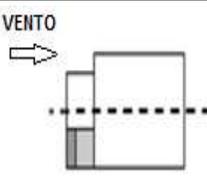
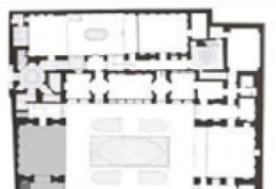
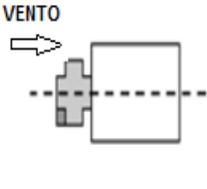
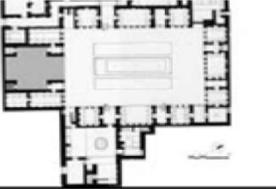


Burj al-Taqa, Dubai

Figura 2.21: Exemplos de torres de vento antigas e de alta tecnologia

Fonte: Adaptado de EL-SHORBAGY, 2010

Tabela 2.6: Posições da Torre de Vento em diferentes tipologias

Tipo	Modelo	Plano	Descrição
1			Torre de vento e jardim posicionados atrás do pátio com seus eixos de simetria na mesma posição.
2			Torre de vento posicionada no canto com o jardim da edificação fora do eixo de simetria do pátio.
3			Torre de vento posicionada no canto com o jardim da edificação, o qual está dentro do eixo de simetria do pátio.

Fonte: Adaptado de ZARANDI, 2009

Tabela 2.7: Resultados da análise do software Fluent®

Parâmetros de Conforto	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Queda de Temperatura para 40°C	29,3 °C	30,8 °C	32,2 °C
Aumento de Umidade Relativa de 17%	36,7%	34,15%	32,9%

Fonte: ZARANDI, 2009

Foudazi e M'Rithaa (2010) relacionaram várias técnicas construtivas para amenizar as altas temperaturas no interior das construções, e uma delas foi a adoção de torres de vento, maximizando a ventilação em regiões áridas como as cidades do Oriente Médio, local com edificações de grande altura, que além de captarem o vento sem poeira,

combinam a torre com outras estratégias de resfriamento passivo, espelhos d'água por exemplo, para criar um espaço termicamente confortável (figura 2.22).



Figura 2.22: Emrani House, Irã

Fonte: FOUDAZI; M'RITHAA, 2010

Jafarian *et al* (2010) estudaram a viabilidade do “Naghb”, construção típica da cidade de Bam, Irã, o qual consiste em uma torre de vento acoplada a um túnel subterrâneo que liga a edificação à torre (figura 2.23). A umidade do solo faz com que o ar do túnel se resfrie e refrigere a construção internamente. Entretanto, o terremoto ocorrido em 2003 nesse local destruiu essas edificações, e então, para a pesquisa foi criado um projeto utilizando aparelhos que simulavam o vento e mediam a sua velocidade, os quais foram colocados no início e fim do túnel juntamente com os termômetros (figura 2.23). Após as medições aplicaram-se as equações de conservação de massa, energia e momento com os dados numéricos coletados, cujos resultados permitiram concluir que o “Naghb” possui um bom desempenho, pois diminui a temperatura em até 8°C nos meses mais quentes do ano.

Mak (2010) simulou com o software Fluent[®] uma torre de vento cujas dimensões e campo limite encontram-se na figura 2.24, sendo testada em diferentes posições e com velocidade de vento variando entre 0,5 e 6m/s (figura 2.25). Os resultados fornecidos pelo software permitiram concluir que quando o ângulo de incidência do vento é de 0°, a velocidade máxima do vento no interior da edificação é próxima à externa, sendo a torre de vento um elemento eficaz para promover ambientes termicamente confortáveis.

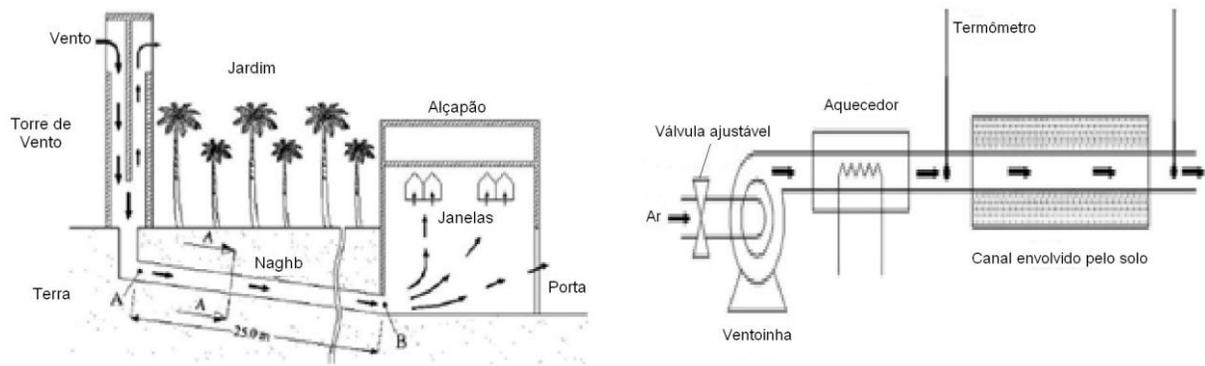


Figura 2.23: Esquema do “Naghb” (esquerda) e do projeto experimental (direita)
 Fonte: Adaptado de JAFARIAN *et al*, 2010

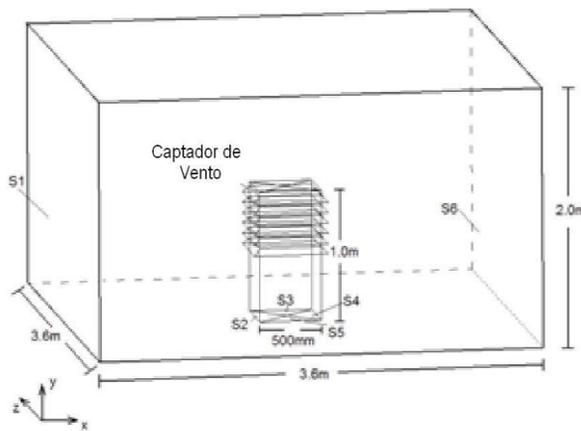


Figura 2.24: Modelo 3D de torre de vento

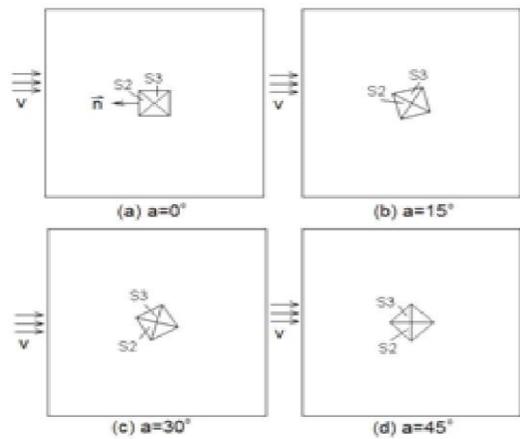


Figura 2.25: Posições dos modelos em relação à direção do vento

Fonte: Adaptado de MAK, 2010

Nasri e Hekmatpanah (2010) afirmaram que a melhor solução para reduzir efeitos de desconforto térmico é a integração da arquitetura tradicional e da tecnologia moderna, que seria uma oportunidade de utilizar elementos arquitetônicos antigos como a torre de vento, a qual consiste em uma solução simples para países como o Irã, desenvolvendo projetos criativos com a vantagem de controlar a temperatura interna das edificações submetidas a condições climáticas desagradáveis.

Bouchahm, Bourbia e Belhamri (2011) realizaram um estudo em Quargla, Argélia, região de clima quente e seco, onde fizeram as medições em dois tipos de construção: uma com torre de vento em funcionamento e outra inativa (figura 2.26). As temperaturas foram medidas interna e externamente às edificações, e, após a análise dos resultados concluiu-se que a torre ativa amenizou a temperatura interna, cuja variação chega a 5°C em relação à externa, enquanto na torre inativa não passa de 1°C.



Figura 2.26: Esquema das edificações com torre de vento analisadas: interna (esquerda) e externa (direita)

Fonte: BOUCHAHM; BOURBIA; BELHAMRI, 2011

Para explorar o potencial dessa torre foi implementado um sistema de umidificação das paredes para reduzir a temperatura do ar antes deste entrar no interior da edificação, completando com água o reservatório localizado na parte inferior da torre (figura 2.27). Posteriormente às medições e análise de temperaturas concluíram que o aumento da umidade do ar eleva a variação entre as temperaturas interna e externa, chegando a 7°C de diferença.

Além desses experimentos, realizaram também, simulações numéricas utilizando as equações de transferência de calor e massa por meio da introdução de conduites (tubos) de variadas seções no interior da torre para aumentar a superfície de contato (figura 2.28). Os resultados obtidos mostraram que adotando materiais porosos para

esses conduites e aumentando a rugosidade ocorrerá uma otimização do fluxo de ar interno (troca de calor), por um melhor direcionamento do vento captado.

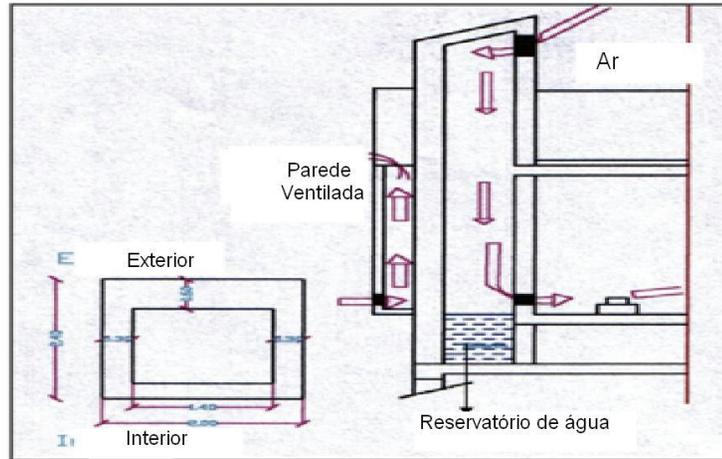


Figura 2.27: Torre de vento com sistema de umidificação

Fonte: Adaptado de BOUCHAHM; BOURBIA; BELHAMRI, 2011

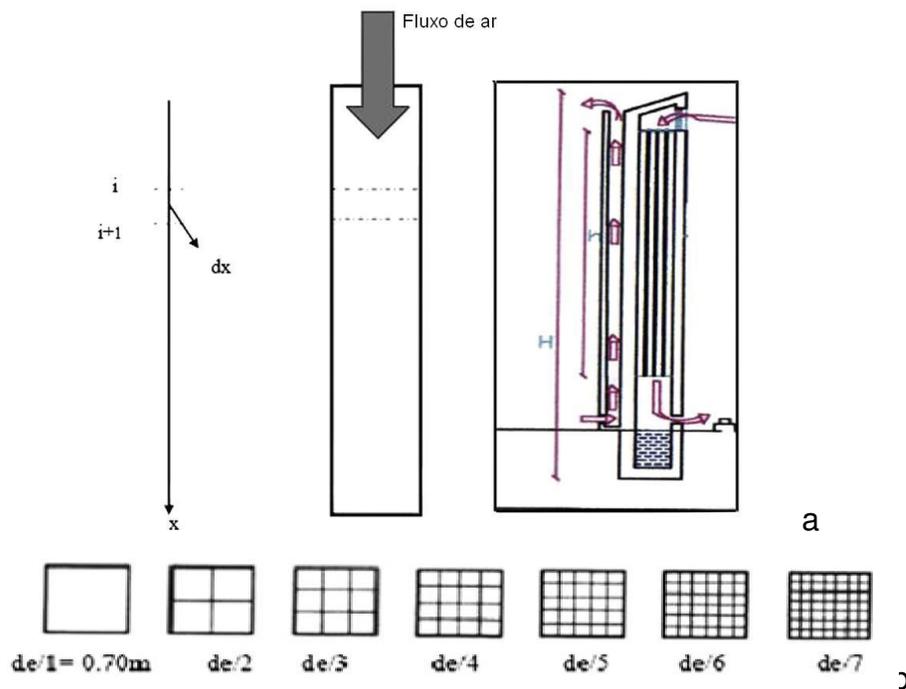


Figura 2.28: Esquema da torre de vento para a simulação numérica (a) e disposição dos conduites variando a seção (b)

Fonte: Adaptado de BOUCHAHM; BOURBIA; BELHAMRI, 2011

Percebe-se, pelos estudos pesquisados, que as torres de vento constituem uma eficiente alternativa arquitetônica para a renovação do ar e do conforto higrotérmico. Entretanto, esse dispositivo pode ser potencializado acrescentando-se a ele um aspersor (umidificador) ou espelhos d'água ao seu redor, e, também pode-se realizar mudanças em suas aberturas e divisórias para um melhor direcionamento do ar captado.

2.2. Túnel de Vento

2.2.1. Definição

Segundo Machado, Tibiriçá e Jentsch (2008) os túneis de vento são recursos laboratoriais capazes de produzir correntes de ar em condições controladas, sendo o interesse determinar as características do escoamento de um fluido quando em contato com um modelo. É um recurso utilizado no ensino e em diversas áreas de pesquisa para subsidiar o processo de projeto. Dentre os estudos possíveis na área de arquitetura e urbanismo, um que requer ações práticas refere-se ao desenvolvimento de ensaios sobre movimentação do ar em ambientes, construídos como modelos reduzidos para ensaios em túnel de vento.

O estudo da circulação do ar, utilizando modelos reduzidos em túneis de vento, permite testar dispositivos e configurações visando à otimização do uso da ventilação natural em ambientes urbanos e em edificações, para torná-los mais eficientes quanto à circulação de ar em diferentes tipos de obras de caráter urbanístico ou arquitetônico.

Prata e Frota (2007) afirmam que para ensaios em túnel de vento a escala do modelo depende da dimensão da seção do túnel, da área de estudo, do tipo de ensaio a ser realizado (estrutural, edifício, meio urbano) e dos critérios de semelhança. Podem-se utilizar técnicas para visualização qualitativa do fluxo de ar com fumaça ou técnica de figuras de erosão com areia e, para medições quantitativas, são utilizados anemômetros de fio quente e/ou tubo de *Pitot*, que permitem medir as velocidades das correntes que incidem sobre o modelo. Existem várias técnicas de medição para a

determinação dos fluxos de ar (direções, velocidades e intensidade de turbulência) em túneis aerodinâmicos.

Nunes (2006) concluiu em sua pesquisa que a adoção da metodologia de medição direta de velocidades, utilizando anemômetro de fio quente, permite a obtenção de vazões de ventilação sem iterações, com resultados compatíveis aos modelos teóricos que se baseiam na diferença de pressões externas e internas.

2.2.2. Pressão de velocidade

Para Mesquita, Guimarães e Nefussi (1988) quando uma certa massa de fluido está em movimento com velocidade v , ela possui, além da energia potencial referente a sua pressão estática, uma parcela de energia cinética. Se um corpo qualquer for colocado em contato com esse fluido e em oposição ao movimento, agirá sobre sua face, além da pressão estática, também uma outra força, referente à energia cinética que o fluido tinha quando em movimento e que perdeu, uma vez que teve de parar ao encontrar a face do corpo.

A energia cinética por unidade de massa é dada por:

$$E_c = \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Como o fluido para ao encontrar a face do corpo, toda a energia cinética é transferida ao corpo sobre a forma de força. Uma vez que a unidade da equação anterior é de comprimento, então representa-se pressão com a unidade de comprimento (altura de coluna do fluido), com a pressão cinética sendo:

$$p_c = \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

onde v é a velocidade do fluido (em m/s), g a aceleração da gravidade (em m/s²), e p_c a pressão cinética em altura de coluna do fluido que está escoando (em m).

É importante salientar que a pressão cinética é sempre positiva ou nula. Ao contrário da pressão estática, que se manifesta em todos os sentidos, a pressão cinética manifesta-se somente no sentido do movimento.

A pressão total é dada como a soma algébrica das pressões estática e cinética:

$$p_t = p_e + p_c \quad (2.3)$$

onde p_e é a pressão estática (em m), p_c a pressão cinética (em m) e p_t a pressão total (em m).

A pressão total, sendo uma soma algébrica, pode ser positiva, negativa ou nula.

Segundo Liddament (1986), quando uma corrente livre atinge um obstáculo, a pressão real do vento, num dado ponto do obstáculo, é o produto da pressão dinâmica por um coeficiente de correlação chamado de coeficiente de pressão (C_p).

Os coeficientes de pressão dependem da forma, da porosidade do edifício e da direção do vento. Eles são determinados experimentalmente, em geral, por meio de testes em túnel de vento e são adimensionais:

$$C_p = \frac{p-p_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} \quad (a) \quad \text{ou} \quad C_p = \frac{p-p_{ref}}{p_{dinâmica}} \quad (b) \quad (2.4)$$

onde C_p é o coeficiente de pressão no ponto considerado (adimensional), p a pressão no ponto considerado (em Pa), p_0 a pressão estática em um ponto do escoamento não perturbado pelo modelo físico (em Pa), ρ a densidade do ar no interior do túnel de vento (em kg/m³), V_0 a velocidade do ar em um ponto de escoamento não perturbado pelo modelo físico (em m/s), p_{ref} a pressão de referência (em Pa) e $p_{dinâmica}$ a pressão dinâmica (em Pa).

2.2.3. Ensaio em Túnel de Vento e Conforto Térmico

Davidson *et al* (1996) realizaram uma pesquisa para verificar a ventilação no meio urbano utilizando modelos reduzidos, variando as configurações de distribuição e distância entre as maquetes (figura 2.29), nos túneis de vento da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e do Departamento de Matemática Aplicada e Física Teórica da Universidade de Cambridge, Inglaterra. Os resultados mostraram que há dois mecanismos que determinam o comportamento de um fluido passando por um elevado grupo de obstáculos: a divergência e convergência de linhas de corrente em torno desse grupo como um todo e as alterações na estrutura da turbulência como redemoinhos ocorridos nos obstáculos individuais. Portanto, mudanças na estrutura da turbulência têm pouco efeito sobre a diminuição da concentração média e a propagação do fluido. Observaram-se, também, alterações em alguns parâmetros influentes no comportamento do fluido, como a posição das edificações em relação ao vento, a qual determina as proporções do fluido que passarão no interior e sobre as peças, mostrando que a distância entre os obstáculos é inversamente proporcional à altura do fluxo.

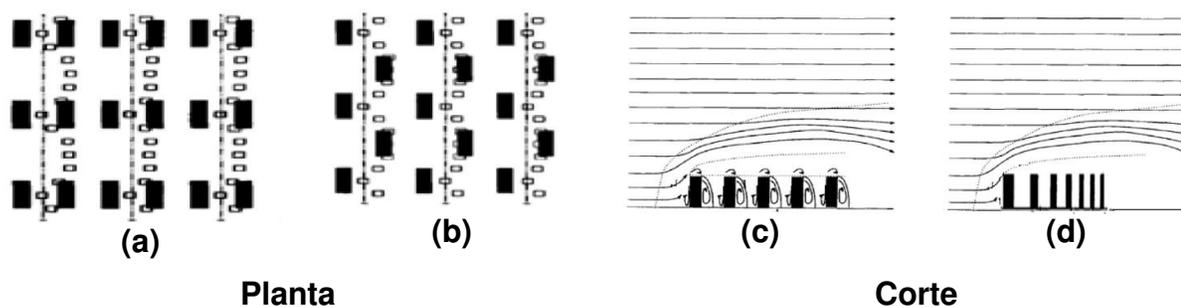


Figura 2.29: Distribuição das maquetes no túnel de vento: variação do alinhamento (a e b) e da distância entre as peças (c e d)

Fonte: DAVIDSON *et al*, 1996

Kato *et al* (1997) estudaram a ventilação natural de um grande mercado construído em Tóquio (figura 2.30), utilizando simulação em túnel de vento e computacional, nos quais foram verificadas a taxa de fluxo de ar, pressão do vento e distribuição de temperatura.

Após analisarem os resultados dos dois métodos e comparando-os entre si concluíram que o software oferece uma análise confiável e detalhada da ventilação cruzada, além de destacarem a importância da análise computacional, pois existem certos detalhes não realizados pelo túnel de vento, que se tornam possíveis de serem observados em softwares específicos.

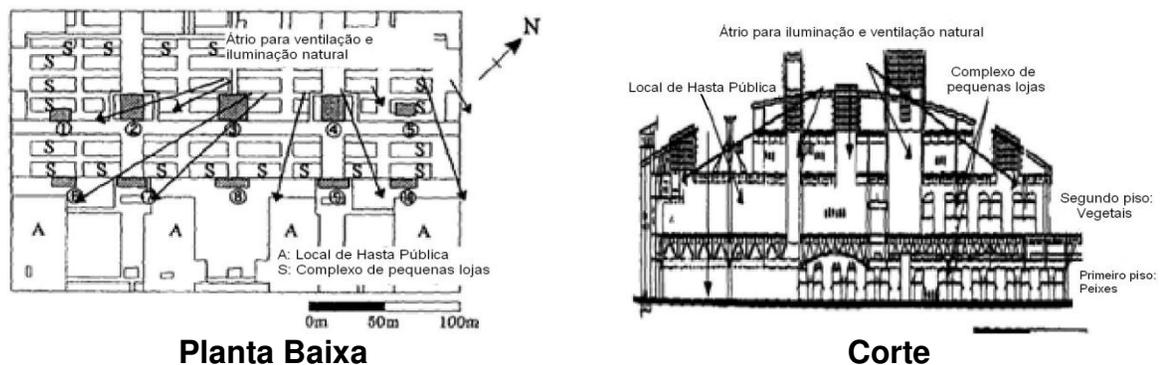


Figura 2.30: Esquema do mercado analisado em túnel de vento e em software

Fonte: Adaptado de KATO *et al*, 1997

Cermak (2003) realizou uma revisão de BLWTs (Túnel de Vento de Camada Limite) e sistemas de aquisição de dados disponíveis atualmente, revelando que testes BLWT continuam a prestar cada vez mais informações úteis sobre a ação do vento para o projeto estrutural. O estímulo para essa tendência foi o desenvolvimento e o uso generalizado da H-FBB (Base de Equilíbrio de Alta Frequência) e o SM-PSS (Sistema Sincronizado de Detecção de Pressão). Enquanto as aplicações de teste BLWT na prática da engenharia civil têm sido mais comuns para efeitos do vento sobre estruturas, aplicações para problemas ambientais urbanos de ventos ao nível de pedestres e qualidade do ar estão se tornando igualmente comuns, aproximando as relações de trabalho entre engenheiros estruturais, arquitetos e urbanistas.

Hernandes, Duarte e Gonçalves (2003), fizeram a proposta de um edifício alto na Avenida Paulista, em São Paulo, onde de início foi feito um mapeamento de uso e ocupação do solo na região dessa avenida, especificando a altura dos edifícios para dar

suporte à confecção do modelo físico e computacional. Esse levantamento foi essencial para os estudos de insolação, que foram feitos com simulações usando o software Ecotect[®], e para os estudos de ventilação no meio urbano, realizados no túnel de vento de camada limite atmosférica do Agrupamento de Vazão - Laboratório de Vazão do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, inaugurado em julho de 2002.

Com o túnel recém-concluído, os ensaios realizados para este trabalho foram os primeiros na área de arquitetura. O modelo, com nove quadras urbanas, foi confeccionado em refugo de madeira e pintado na cor cinza para favorecer a visualização dos ensaios no túnel, e, localiza-se no entorno do terreno de estudo, na escala 1: 500 representando, aproximadamente 250.000m² de área.

Simultaneamente à confecção do modelo foi realizado um trabalho de campo na Avenida Paulista e nas ruas adjacentes, próximas ao terreno, para medições de direção e velocidade de vento na altura do pedestre. Com uma equipe de 4 pessoas e equipamentos do LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAU/USP, foram feitas 4 sequências de medidas, com 10 minutos cada, totalizando 40 medidas com registros a cada minuto. Essas medidas auxiliaram a determinação do perfil dos fluxos de ar na área em questão e a verificação da direção predominante dos ventos. A ocupação urbana e a topografia podem alterar a velocidade e a direção predominante dos ventos, fatores que foram determinantes para a forma aerodinâmica do edifício proposto.

Com o mapeamento em mãos foi confirmada a direção predominante do vento a Sudeste, necessária para a correta orientação da maquete no túnel, e foi feito o ajuste manual das pás do ventilador para a velocidade medida, entre 0,2 e 2,5m/s, em média.

Para a visualização dos fluxos de ar foram testados dois procedimentos: um gerador de fumaça à base de fluido e gelo seco (figura 2.31).

A forma do edifício foi alterada diversas vezes ao longo do processo de projeto. O ensaio foi um dado a mais para essa tomada de decisões, juntamente com todas as outras considerações de insolação, funcionais, de circulação, de aproveitamento de área útil, etc.

Por sua orientação e forma aerodinâmica, o edifício proposto minimiza os efeitos de borda e os contrastes existentes entre as zonas de alta e baixa pressão. Os vórtices inevitavelmente ocorrem com a colocação de qualquer obstáculo, mas de maneira menos impactante, minimizando o desconforto provocado pelo vento nos arredores de um edifício alto.



Figura 2.31: Ensaio no túnel de vento do IPT

Fonte: HERNANDES; DUARTE; GONÇALVES, 2003

Jiang *et al* (2003) estudaram a ventilação de três tipos de edificação, com uma abertura a barlavento, a sota-vento e duas aberturas (ventilação cruzada) por meio de ensaios no túnel de vento da Universidade de Cardiff, País de Gales, e de simulação computacional. Analisando os resultados percebeu-se que, em geral, não há diferenças

entre os dois tipos de ensaio, nos quais foram estudados o fluxo de ar, velocidade do ar externa e interna ao modelo e pressões nas superfícies, embora haja algumas discrepâncias devido ao refinamento das malhas utilizadas nas simulações. Foi verificado, também, que a pressão é um fator importante na indução de vento para a ventilação em edificações de uma única abertura.

Pravia e Coronetti (2003) desenvolveram no Laboratório de Ensaios de Sistemas Estruturais (LESE) da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, RS, um projeto de um Mini Túnel de Vento (MTV) de baixo custo e fácil construção, com o objetivo de mostrar qualitativamente o comportamento do vento sobre as formas geométricas e como o vento atua na simulação de um ambiente medindo coeficientes aerodinâmicos (figura 2.32). Alguns ensaios foram mostrados neste trabalho permitindo concluir que a reprodução do MTV é possível em qualquer escola de engenharia ou arquitetura do Brasil, estando os autores à disposição para repassar plantas e assessorias, pois apresenta a vantagem de baixo custo.

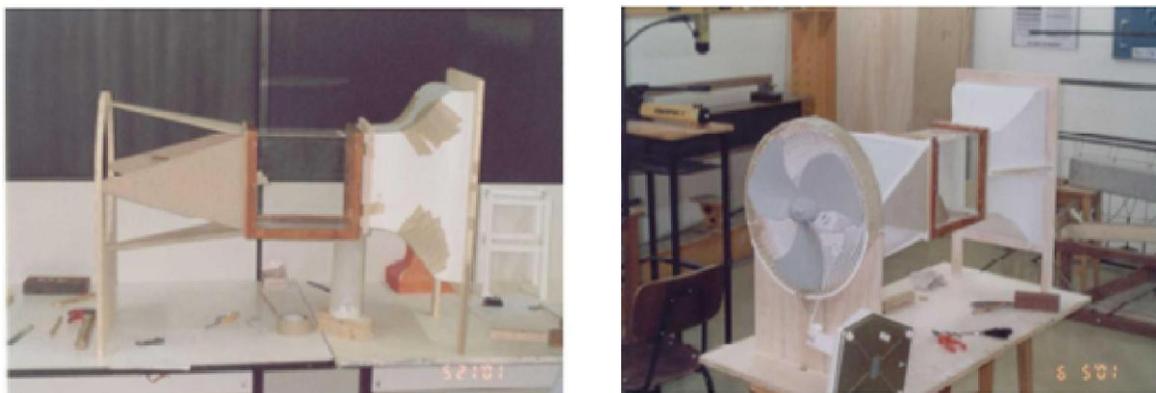


Figura 2.32: Esquema do protótipo do Mini Túnel de Vento (MTV)

Fonte: PRAVIA; CORONETTI, 2003

Chiu e Etheridge (2004) analisaram a ventilação em uma edificação com duto acoplado em sua cobertura (figura 2.33) utilizando túnel de vento e modelos matemáticos para determinar a magnitude e direção do fluxo de ar. Os resultados foram comparados e concluiu-se que não há grandes diferenças nos valores fornecidos na taxa de ar ao contrário dos valores da pressão interna, os quais ocorreram por erros de medição ou

previsão, sendo necessário realizar mais investigações para tornar mais clara a distinção entre essas duas fontes.

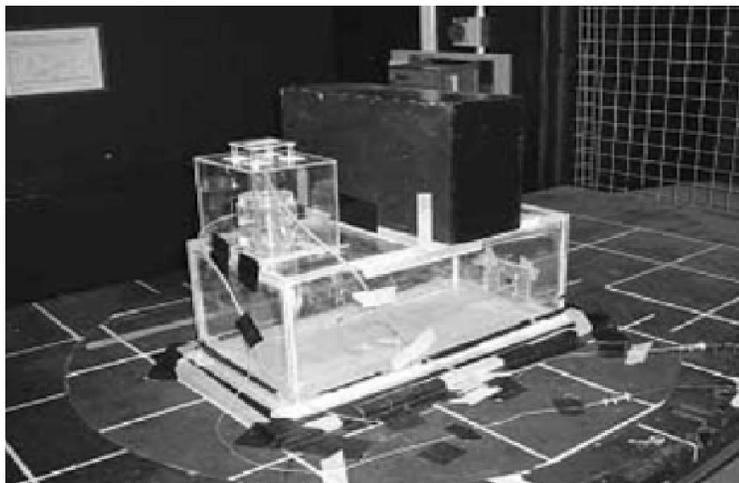


Figura 2.33: Esquema da maquete no Túnel de Vento

Fonte: CHIU; ETHERIDGE, 2004

Ahmad, Khare e Chaudhry (2005) fizeram uma revisão sobre vários ensaios em túnel de vento abordando a ventilação em “canyons” urbanos, os quais concentram elevadas quantidades de poluentes. Analisando os trabalhos concluíram que em “canyons” profundos, os vórtices interagem mal com o fluxo de vento acima deles e não contribuem significativamente para a remoção de gases de escape, e, as quadras curtas proporcionam uma melhor ventilação nos cantos, devido à formação de vórtices nessa região, mas este efeito se desvanece com o aumento do comprimento da rua. No interior dos cruzamentos urbanos, os vórtices de vento, zonas de baixa pressão e efeito canalização podem causar elevada captura de poluentes na parte inferior. Em caso de edifícios de grande altura, formando cruzamentos, oferecem melhor ventilação nas esquinas devido à formação de vórtices nos cantos.

Chiarello (2006) analisou a ventilação natural de um pavilhão industrial ensaiando um modelo reduzido em túnel de vento, e, comparou os resultados com modelos matemáticos de outros autores. Analisando os resultados concluiu que os ensaios confirmam o incremento de vazão de ventilação, indicado pelos modelos teóricos, quando as áreas das aberturas de entrada e saída do ar não são iguais. Além disso, a

aplicabilidade dos modelos matemáticos no projeto de sistemas de ventilação natural em pavilhões industriais considerando efeito chaminé se confirmou, pois foram obtidos, em média, valores de vazão de ar próximos aos determinados pelos ensaios.

Carvalho, Corbella e Silva (2007), apresentaram alguns resultados da aplicação de uma nova metodologia para a análise das interações entre a forma urbana e o clima, baseada na metodologia de avaliação das ações do vento no planejamento da ocupação do solo e na teoria do sistema clima urbano. Utilizando experimentos em túnel aerodinâmico de camada limite atmosférica, medições de variáveis microclimáticas em João Pessoa-PB e de análises estatísticas, constatou-se que a correlação entre a forma urbana e a variação da temperatura do ar depende das condições de ventilação intra-urbana (velocidade e direção), e, ao mesmo tempo, da orientação da malha urbana, da rugosidade e da permeabilidade da forma urbana.

As correlações foram mais nítidas com os ventos mais lentos de leste e nordeste. A moderada correlação entre a temperatura do ar e a forma urbana, por meio das variáveis taxa de ocupação, índice de aproveitamento e fator de visão do céu, indica um alto grau de homogeneidade na ocupação da área estudada, notando-se um leve adensamento da porção oeste com edifícios mais altos e maior espaçamento entre eles, e uma ocupação mais horizontal na porção leste, com a predominância de edificações com até dois pavimentos.

Também se deve ao grande número de variáveis envolvidas, muitas delas se relacionando fortemente e causando efeitos de colinearidade e multicolinearidade. Entretanto, pelos níveis de significância e coeficientes de determinação (r^2) encontrados, os índices de correlação parecem ser satisfatórios para o campo da climatologia urbana.

O comportamento climático do ambiente observado ao longo do dia se explica pela compreensão dos processos físicos de trocas térmicas, condicionados pela interação clima-estrutura urbana. Dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

não é possível estabelecer como regra que o aumento da densidade construída (e assim, a verticalização das construções) provoque a elevação da temperatura. Os resultados apresentados indicaram exatamente o contrário, o que remete à hipótese de que até um certo limite a verticalização das edificações contribui para a redução da temperatura, pois aumenta o sombreamento das ruas e, em alguns casos, provoca a aceleração dos ventos;

deve-se, no caso dos climas tropicais úmidos, buscar uma forma urbana que proporcione ambientes com uma menor quantidade de horas de exposição ao sol (apenas o suficiente para a higienização) e ventilação abundante, com velocidades dentro dos limites de conforto e segurança aos pedestres; o comportamento verificado na região afastada do mar, à tarde, com temperatura do ar variando, em média, de -0,18°C a +0,48°C em relação ao aeroporto, reforça a essa afirmativa;

os resultados apresentados mostraram o quanto a velocidade do vento, a umidade relativa do ar, a nebulosidade e a radiação solar interferem na temperatura, estando essas variáveis também condicionadas pela forma urbana, cuja função no sistema é, em parte, controlar os escoamentos e a incidência da radiação solar no ambiente;

é equivocado atribuir à maior incidência de ventos mais fortes e constantes nas cidades litorâneas, a fraca correlação entre a forma urbana e a temperatura do ar. Em primeiro lugar há que ser considerada a temperatura do escoamento (de vento). Em segundo lugar, se a forma urbana não for permeável à ventilação predominante no local, essa (mesmo com temperatura inferior à estrutura urbana) não será capaz de retirar o calor armazenado no interior da cidade. Em João Pessoa, as maiores correlações entre a temperatura do ar e a forma urbana ocorreram exatamente quando estas também foram boas com a velocidade do vento, principalmente quando os ventos sopraram de leste e de nordeste à tarde. Daí a importância dos experimentos em túnel aerodinâmico para o conhecimento mais aprofundado do comportamento desta variável;

a correlação inversa entre a temperatura do ar e a condição do céu (nebulosidade) também não é absoluta. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que essas correlações tendem a ser inversas, pela manhã e à tarde, e diretas à noite. A nebulosidade forma uma barreira à passagem da radiação, da atmosfera para a cidade durante o dia, e da cidade para a atmosfera durante a noite;

as correlações verificadas indicam que a velocidade do vento tende a diminuir à medida que se adentra ao continente, resultado coerente com os perfis de velocidade do vento medidos no túnel aerodinâmico para esta mesma área. Já se faz perceber o efeito negativo do escalonamento do gabarito em altura dos edifícios desta área, conforme induz a legislação urbana local;

a ilha de calor diurna verificada no local apresenta uma magnitude de 2,3°C em média e máxima de 3,7°C com ventos leste e nordeste no período observado, valores preocupantes, já que a área estudada ainda é pouco adensada e se encontra no primeiro plano em relação à incidência dos ventos dominantes, o que leva a crer que as porções mais centrais da cidade podem estar ainda mais aquecidas.

Corbella, Loredou-Souza e Paluch (2007), descreveram o novo Túnel de Vento de Camada Limite instalado na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro (FAU/UFRJ), servindo como demonstração da interação entre o meio construído e o vento. Tendo como finalidade inicial a demonstração aos alunos de graduação, a colaboração entre vários grupos de pesquisa o transformou em um instrumento de pesquisa científica de consequências sobre regiões delimitadas da cidade ou sobre vários efeitos de decisões arquitetônicas sobre o edifício. O túnel, de circuito aberto, tem um comprimento total aproximado de 7,20m, possuindo um ventilador centrífugo, instalado a barlavento do modelo a ser ensaiado, constando de várias gavetas deslizantes com telas e colmeias que tornam os perfis de velocidade do escoamento mais uniformes. Posteriormente, na seção de ensaio do túnel foram dispostos vários dispositivos, descritos no trabalho, para simular um escoamento com propriedades semelhantes ao vento real. Os modelos se localizam sobre uma mesa giratória, com o fim de simular o vento provindo de várias direções. Foram descritos

vários ensaios que podem ser realizados com esta ferramenta, propostos para vários métodos de visualização, fundamentalmente erosão de areia.

Cóstola, Alucci e Etheridge (2007), apresentaram uma revisão da teoria utilizada na execução de ensaios com modelos em escala em túnel de vento, no que diz respeito à extrapolação, para o edifício em tamanho natural, dos resultados obtidos nos experimentos. Três casos são apresentados separadamente: escoamentos externos, escoamentos no envelope do modelo sem fontes de calor internas, e por fim modelos com fontes internas de calor submetidos à ação do vento. Os resultados obtidos em um exemplo de aplicação são apresentados, para um modelo com escoamentos externo e no envelope do modelo sem fontes de calor interna.

Por fim, concluem que os estudos com modelos de cantos vivos são viáveis, enquanto formas orgânicas (sem cantos vivos) apresentam maiores dificuldades para a obtenção da similaridade e, neste caso, a independência dos resultados em relação ao valor do número de Reynolds deve ser obtida, pois a similaridade em experimentos em escala é fundamental para a obtenção de resultados aplicáveis ao edifício real. No caso dos ensaios em túnel de vento, a similaridade completa é bastante rara, e grande parte dos experimentos é possível graças à independência do escoamento em relação a Reynolds.

Nestes casos, concluem que o estudo da ventilação natural por meio de ensaios em túnel de vento é tecnicamente viável e não apresenta maiores complicações em modelos sem fontes de calor internas. Contudo, experimentos que não atentem para a determinação de Reynolds crítico (do edifício e das aberturas) podem levar a erros significativos.

Modelos com forma orgânica devem ser estudados com cautela, já que muitas vezes não apresentam independência de Reynolds. Uma solução mais dispendiosa é o uso de túneis de vento de grande seção e velocidades elevadas.

Modelos com fontes de calor internas representam um desafio na obtenção da similaridade, sendo este tipo de experimento muito mais complexo que os demais, e seu estudo é restrito a casos particulares.

Matsumoto e Caram (2007) analisaram o desempenho de um dispositivo passivo (coletor inercial), por eles construído, que funciona como abertura para ventilação natural do ambiente interno e também retém parte dos materiais particulados, existentes no ar, que passam através dele. O funcionamento do coletor baseou-se na inércia que cada partícula possui, ou seja, à medida que o fluxo de ar entra pela abertura do coletor inercial ele é acelerado devido à redução na seção transversal do duto. Como estes dutos são construídos com obstáculos que forçam a mudança de direção do fluxo, as partículas mais pesadas, pela sua maior inércia, seguem em trajetória retilínea, impactando-se contra o obstáculo. Para verificar o rendimento do coletor inercial, foram realizadas amostragens de material particulado em filtros finos (para coleta de partículas com diâmetro aerodinâmico de até 2,5 μ m) e grossos (acima de 2,5 μ m), colocados em série. Estas amostragens ocorreram no exterior e no interior da célula-teste com dois coletores inerciais instalados em faces opostas. Após a análise gravimétrica destes filtros, verificou-se que os coletores inerciais produziram, no interior da célula-teste, uma redução de até 70% na massa de particulado grosso e de até 7% na massa de particulado fino.

Os resultados mostraram que os coletores inerciais além de permitirem a ventilação do ambiente interno, apresentam uma capacidade muito boa de retenção de material particulado grosso e apesar da pequena capacidade de retenção de material particulado fino, ela é significativa, pois nos ensaios com os anteparos instalados nas aberturas da célula-teste, a concentração de particulado fino aumentou no interior. Diante dos resultados obtidos até o momento, o rendimento do coletor inercial foi considerado bom e a sua aplicação prática viável.

Peregrino e Silva (2007), avaliaram a inter-relação existente entre os escoamentos de ventos e os padrões de ocupação do solo urbano estudados: o padrão de ocupação atual (Adensamento 01), de parte dos bairros do Cabo Branco e Tambaú / João Pessoa

– PB, e outro proposto (Adensamento 04), simulando a ocupação da área com edificações com padrões de gabarito em altura e afastamentos diferenciados daqueles exigidos pela legislação atual.

Assim concluíram que:

Alterando-se os afastamentos praticados, mesmo que se eleve o gabarito em altura das edificações, como estudado no Adensamento 04 (todos os edifícios com 17 pavimentos), promovem-se condições de ventilação bastante aceitáveis;

As condições de ventilação natural estudadas no Adensamento 04 proporcionam maior dispersão dos poluentes, garantindo conseqüentemente uma melhor qualidade do ar;

Com tais condições de ventilação, pelos escoamentos penetrarem com mais facilidade na malha urbana, são favorecidas as trocas térmicas, podendo reduzir as possibilidades de formação de *ilhas de calor*;

Finalmente, os resultados obtidos dos experimentos referentes ao Adensamento 04, ao contrário do Adensamento 01, resultariam em melhor qualidade de vida (conforto térmico, conforto lumínico, saúde em termos de qualidade olfativa e respiratória do ar), de racionalização de energia e principalmente da quantidade de unidades habitacionais beneficiadas, ultrapassando de longe os resultados obtidos nos adensamentos escalonados propostos pela Lei.

Queiroga e Silva (2007) determinaram o dimensionamento de aberturas, considerando a ventilação natural, tendo como objeto empírico o Edifício multifamiliar *Maison de France* localizado no bairro Tambaú, na cidade de João Pessoa/PB, visando o aproveitamento dos ventos alísios dominantes nesta cidade, tendo em conta o citado edifício implantado em quatro pontos determinados, na malha urbana, nos quais foram medidos perfis de velocidade do vento utilizando-se de ensaios em Túnel Aerodinâmico

de Camada Limite Atmosférica com maquete física em escala da área estudada, e de cálculos referentes à ventilação interna e ao dimensionamento das aberturas.

Os resultados constataram a necessidade de aberturas cada vez maiores à medida que se adentra a malha urbana a partir da orla marítima em direção ao centro da cidade para que estas possam atender as condições necessárias, em termos de ventilação natural para o ambiente interior, definidas pelas normas, deixando claro o comprometimento das condições de ventilação no interior do edifício, ficando demonstrada sua inadequação em termos de ventilação.

Percebeu-se que a não consideração da localização da edificação na malha urbana, como também o não conhecimento do seu entorno e, sobretudo, o dimensionamento deficiente das aberturas externas de edificações, podem levar a equívocos que têm como consequência o comprometimento da quantidade de ventilação e da qualidade de ar interior. Sendo assim, não se deve deixar de avaliar a energia necessária para corrigir tais problemas. Estas situações podem ser praticamente evitadas com a consideração, durante a fase de projeto de arquitetura, do regime de ventos locais e suas inter-relações com o meio construído.

Esses fatos podem ser decorrentes tanto do desconhecimento dos profissionais sobre o assunto, quanto pela escolha de soluções plásticas não condizentes com a realidade climática local.

Um outro aspecto diz respeito às tipologias atuais de fechamentos de aberturas, que possuem área líquida real para ventilação que, na grande maioria das vezes, corresponde à metade da abertura, em duas folhas de vidro corrediças, como é o caso da edificação estudada, as quais, quando sobrepostas, resultam em perdas significativas em termos de área para a ventilação.

Além desses aspectos considera-se que boa parte das questões ligadas à ventilação interior de ambientes advém, evidentemente, dos padrões de ocupação do solo urbano. Quando da opção por um deles, normalmente os ventos são considerados de maneira

superficial, desprezando-se seu comportamento dinâmico e suas inter-relações com o meio construído.

Costola e Etheridge (2008) estudaram a ventilação natural de uma edificação com diferentes configurações (figura 2.34), utilizando ensaios no túnel de vento da Escola de Ambiente Construído da Universidade de Nottingham, Inglaterra. Pela análise dos resultados perceberam que em termos de pressão total, essas configurações apresentam um comportamento diferente para a forma testada em Chiu e Etheridge (2004), pois são mais suscetíveis a flutuações de pressão, e, o efeito do fluxo externo é pequeno quando a saída de ar dos dutos acima da edificação é exposta a ele.

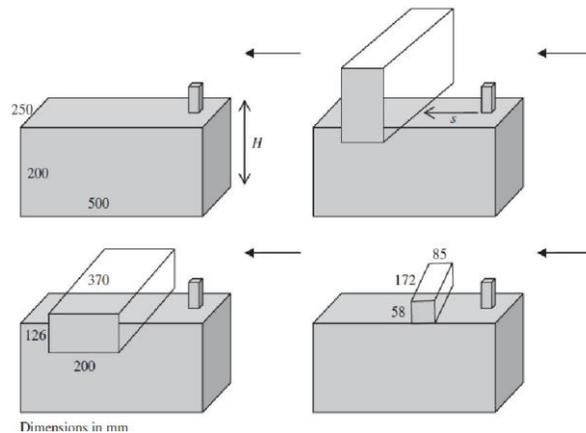


Figura 2.34: Configurações analisadas na simulação

Fonte: COSTOLA; ETHERIDGE, 2008

Gromke *et al* (2008) realizaram um estudo sobre os efeitos aerodinâmicos de uma avenida e a dispersão de poluentes em “canyons” por meio de simulações em túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica Ambiental e das Construções da Universidade de Karlsruhe, Alemanha, onde peças acrílicas (maquetes) foram posicionadas simulando edificações e vegetação (figura 2.35). O mesmo estudo foi feito utilizando o software Fluent[®] e os resultados comparados entre si permitiram concluir que o fluxo de ar próximo às paredes de barlavento reduz a concentração de poluentes nessa região e o ar limpo arrastado se mistura com o ar dentro do “canyon” que conduz à concentrações menores, ocorrendo o oposto nas paredes de sota-vento. Além disso, essa pesquisa

sugeriu maneiras de obter informações quantitativas para o planejamento, avaliação e implementação da utilização de árvores em “canyons” urbanos.

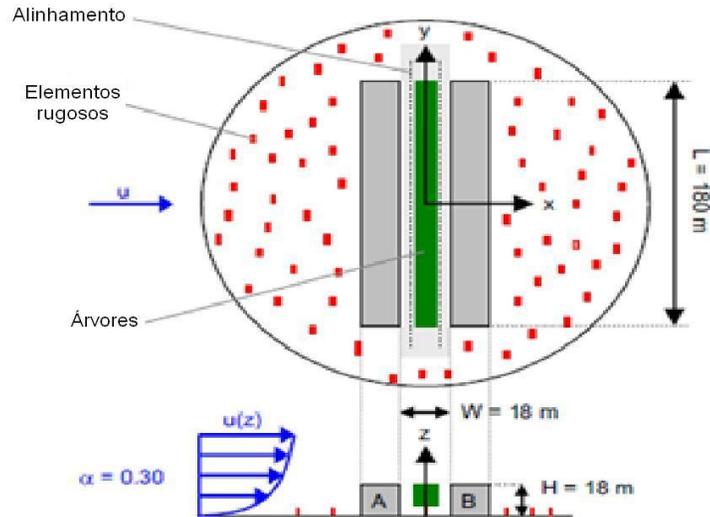


Figura 2.35: Configurações do “canyon” simulado

Fonte: Adaptado de GROMKE *et al*, 2008

Kang e Lee (2008), pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Ciência e Tecnologia de Pohang, Coreia, simularam em túnel de vento o modelo reduzido de uma grande fábrica para verificar sua ventilação natural. Primeiramente foi simulada a configuração original, ou seja, sem grelhas na parte superior da cobertura, e depois, mudando a configuração, adicionando as grelhas, as quais se dividiam em três casos: lâminas a 60° (modelo 1), a 60° e -60° (modelo 2) e 90° e -70° (modelo 3) (figura 2.36). Os resultados mostraram que o modelo 3 apresentou o melhor desempenho na ventilação devido ao alinhamento das lâminas na parte externa e a excelente orientação do fluxo de ar pelas lâminas internas, aumentando o fluxo em cerca de 60% comparando com o modelo original.

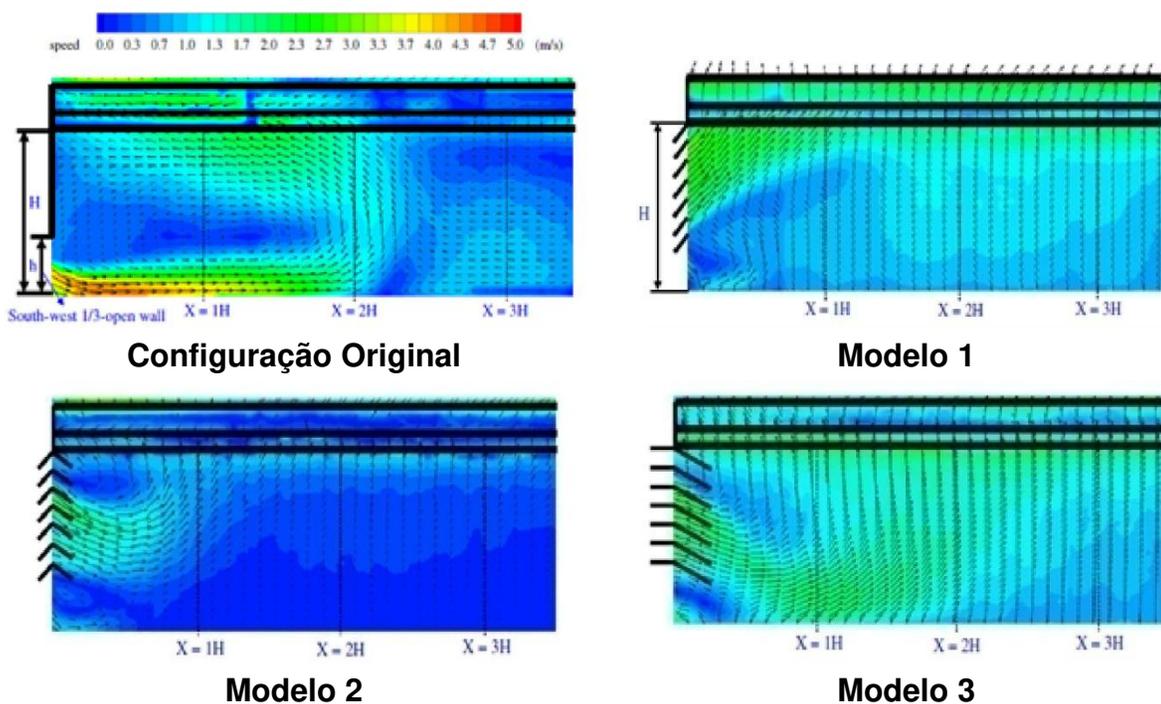


Figura 2.36: Configurações da fábrica simulada

Fonte: KANG; LEE, 2008

Kubota *et al* (2008) realizaram uma pesquisa, no Instituto de Tecnologia de Niigata, Japão, sobre a ventilação em escala urbana utilizando ensaios em túnel de vento. Após uma série de testes de 22 bairros residenciais selecionados de cidades japonesas, concluíram que há uma forte relação entre a quantidade de construção e a velocidade média do vento em cada habitação, ou seja, apartamentos e moradias isoladas. Como esperado, o aumento do índice de construção diminui a velocidade média do vento, e em edificações altas é 24% maior do que em casas separadas. Esse estudo pode ser visto como uma proposta para avaliar os impactos que um empreendimento construtivo pode causar em um ambiente antes de ser realizado.

Larsen e Heiselberg (2008) analisaram estudos sobre ventilação natural realizados por outros pesquisadores e notaram que em nenhum deles havia certeza quanto à expressão matemática que relaciona o ângulo de incidência do vento e o fluxo de ar passando pelas aberturas. Para analisar esses parâmetros foram feitas simulações em túnel de vento com maquetes de edificações portando uma abertura, e, concluíram que a taxa de ar e a força dominante (pressão do vento e diferença de temperatura) se

alteram em função do ângulo de incidência, e a partir disso desenvolveram uma nova expressão, cuja incerteza diminuiu 23% em relação às anteriores.

Zhang e Gu (2008) compararam duas simulações realizadas, numérica (computacional) e experimental (túnel de vento), de maquetes de dois edifícios posicionados adjacentes entre si. As simulações computacionais para determinar a distribuição de pressão sobre o edifício principal foram baseadas nos modelos RANS (Reynolds Medido e Navier-Stokes) e RNG (Grupo de Renormalização), e quando comparadas com os resultados do túnel de vento mostraram concordância qualitativa para a pressão do vento, as forças de base e momentos, os quais são afetados de alguma forma pela interferência do edifício adjacente, permitindo concluir que os modelos utilizados são ferramentas úteis para as previsões de pressões de vento, e, especialmente, as forças do vento agindo em um edifício com outro adjacente.

Buccolieri *et al* (2009) continuaram a pesquisa de Gromke *et al* (2008) sobre os efeitos aerodinâmicos de uma avenida e a dispersão de poluentes em “canyons” por meio de ensaios em túnel de vento, onde peças acrílicas (maquetes) foram posicionadas simulando edificações e vegetação (figura 2.37). Investigaram-se a morfologia, posicionamento e arranjos, cujos resultados indicaram que as menores concentrações de poluentes situaram-se no “canyon” com árvores de copa alta e distribuídas sem espaço entre elas.

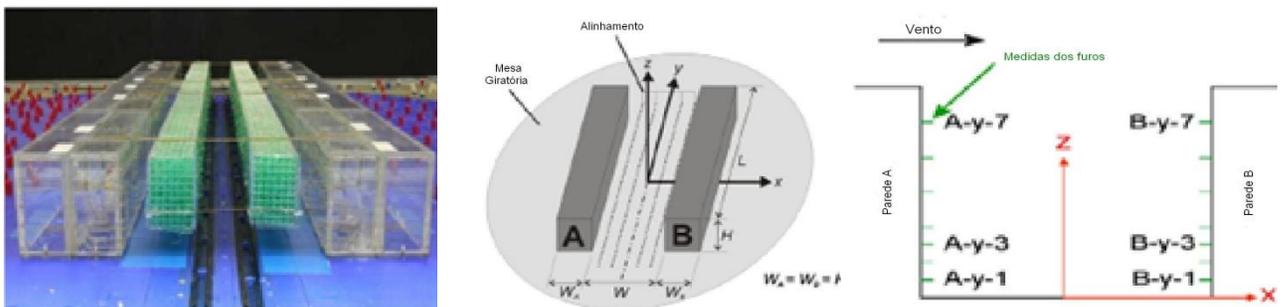


Figura 2.37: Esquema da distribuição das maquetes no túnel de vento

Fonte: Adaptado de BUCCOLIERI *et al*, 2009

Chu *et al* (2009) realizaram uma pesquisa para verificar os efeitos de turbulência sobre os coeficientes de descarga (razão entre a velocidade máxima (ideal) e a velocidade teórica (real) do fluido – C_z) e desempenho da ventilação cruzada em edificações, utilizando ensaio em túnel de vento e modelo reduzido (figura 2.38). Verificou-se que os coeficientes de descarga estão relacionados com o ângulo de incidência do vento e direção do fluxo de ar, mas independem da intensidade de turbulência externa e porosidade da parede. Além disso, a comparação entre os coeficientes de pressão interna, medidos e previstos, mostrou que as equações de fluxo podem ser utilizadas para prever a pressão interna desde que a porosidade seja menor que 6,25% e o ângulo de incidência do vento $\theta=0^\circ$.



Figura 2.38: Maquete inserida no túnel de vento

Fonte: CHU *et al*, 2009

Cóstola, Alucci e Etheridge (2009), pesquisaram a problemática da caracterização das aberturas nos modelos teóricos para cálculo da vazão obtida com o uso de ventilação natural. Apesar da existência de diversas fontes de dados e da relativa simplicidade nos experimentos para a determinação de C_z (coeficiente de descarga), as ferramentas de cálculo e os modelos para a previsão de C_z não permitem que a abertura seja corretamente caracterizada, com consequências indesejadas para a quantificação da ventilação natural.

Contudo, pela adoção de ensaios é possível reduzir a incerteza do cálculo ou ao menos estimar esta incerteza com maior segurança.

A principal conclusão deste trabalho é a viabilidade técnica e econômica da utilização do coeficiente de descarga para a caracterização de aberturas para a ventilação natural. O experimento com ar parado é simples, e os equipamentos envolvidos são de baixo custo e simples operação.

O estudo aponta para a necessidade de flexibilização na definição dos valores de C_z nas ferramentas computacionais de avaliação do desempenho térmico, de forma a considerar valores variáveis com o tempo.

Isto porque fica claro diante do resultado dos experimentos que o valor de C_z varia com a orientação do vento, assim como com o sentido do fluxo na abertura. Uma vez que estes valores variam ao longo do tempo, também o valor de C_z deve variar no cálculo.

Por fim, faz-se claro que experimentos em edifícios reais para a determinação de C_z em grandes aberturas são fundamentais para o desenvolvimento e validação de modelos para a predição deste em função da geometria do edifício, da abertura e da configuração do escoamento.

Dimitrova *et al* (2009), pesquisadores do grupo Desenvolvimento de Ferramentas para Uso Racional de Energia e Sustentabilidade (ATREUS), avaliaram a atuação do vento em torno dos edifícios com paredes aquecidas pela radiação solar por meio de ensaios no túnel de vento e em dois softwares baseados na Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD) (figura 2.39), nos quais foram selecionados campos de vento e temperatura para um dia de verão em uma região específica da cidade de Lisboa. Analisando os resultados concluiu-se que o fluxo de ar pode ser modificado pelo aquecimento solar da construção no meio urbano, mostrando que os modelos computacionais são úteis para a compreensão das condições micrometeorológicas das cidades.

Martins *et al* (2009), examinaram o potencial do uso de torres de vento em edificações residenciais geminadas unifamiliares, a partir do estudo de diferentes configurações de torre de vento para captação e exaustão de ar. Foram realizados ensaios em mesa d'água de modo a se observar as trajetórias de escoamento do ar no interior da edificação em cada situação proposta. O estudo demonstrou bom potencial do dispositivo para renovação do ar interior, tendo um dos estudos proporcionado uma adequada circulação de ar na altura dos usuários.

Por meio deste trabalho realizado foi possível verificar que as torres de vento podem se constituir em estratégia valiosa na promoção da renovação do ar e do conforto ambiental, por meio da circulação do ar no interior das alcovas. Os ensaios na mesa d'água mostraram-se bastante satisfatórios para análise qualitativa sobre a admissão do ar no dispositivo, a circulação no interior do ambiente e a extração, em cada um dos casos de variações examinadas. Apesar das limitações da ferramenta, por permitir apenas a visualização bidimensional do espaço modelado, tal instrumento possibilitou a análise e avaliação de um conjunto de alternativas apresentadas para resolver o problema em questão, além de uma estimativa para as dimensões do dispositivo arquitetônico. Verificou-se que o uso do defletor em quaisquer das situações examinadas se caracteriza como importante elemento a ser associado à torre de vento, possibilitando um melhor direcionamento do fluxo de ar nas alcovas.

Vale ainda ressaltar que para avaliar o potencial da ventilação natural em tipologias construtivas de menor porte, como no caso estudado deste trabalho, o procedimento metodológico adotado se apresenta como ferramenta prática e consistente. Tal condição permite que o método, apesar de simplificado, favoreça uma primeira abordagem antes de se lançar mão de processos mais complexos.

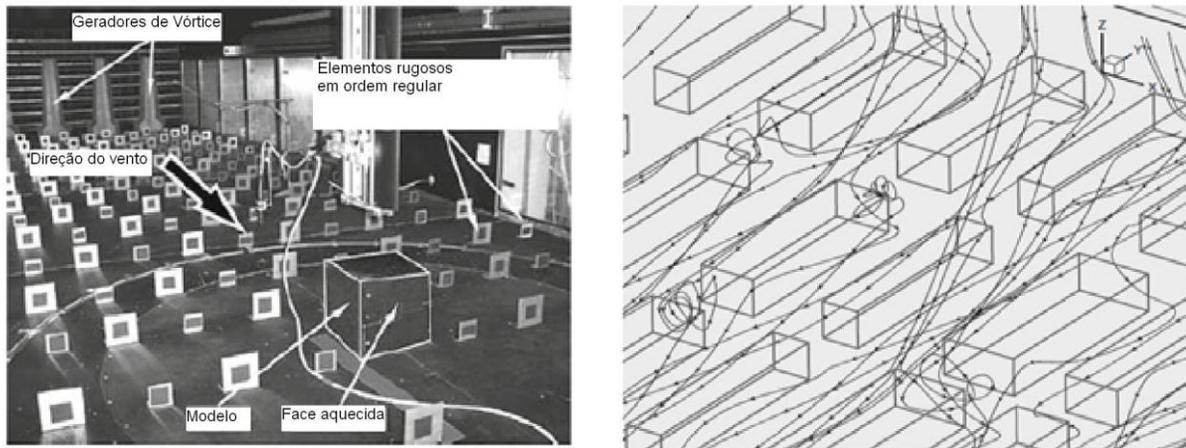


Figura 2.39: Esquema da distribuição das maquetes no túnel de vento (esquerda) e no software (direita)

Fonte: Adaptado de DIMITROVA *et al*, 2009

Szucs, Moreau e Allard (2009) estudaram a ventilação natural de um estádio por meio de ensaio em túnel de vento, com uma maquete na escala 1:300, no Centro Científico e Técnico de Edificações de Nantes (CSTB), variando a sua configuração para selecionar a forma mais adequada (figura 2.40). Após a análise dos resultados das simulações concluiu-se que pequenas aberturas devem ser uniformemente distribuídas na fachada com o telhado pouco inclinado em direção ao campo, desde que o fluxo de ar não exceda o valor limite exigido para o conforto humano.

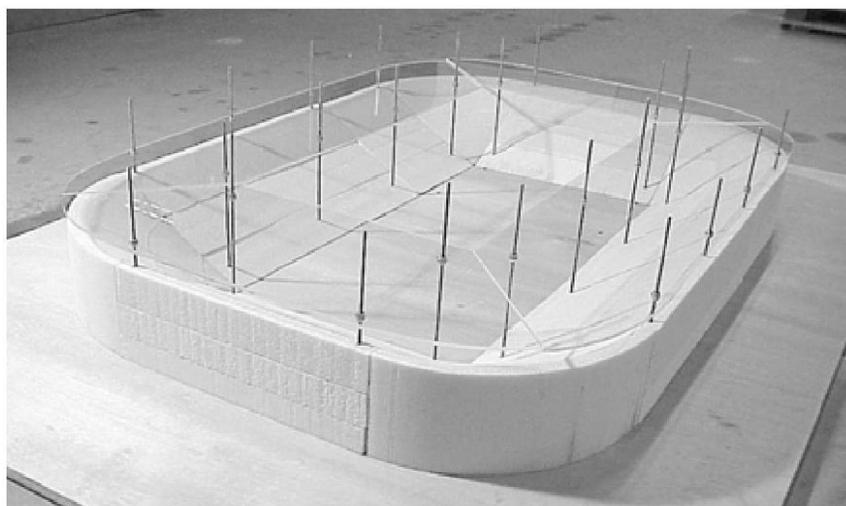


Figura 2.40: Esquema da posição da maquete do estádio no túnel de vento

Fonte: SZUCS; MOREAU; ALLARD, 2009

Bu, Kato e Takahashi (2010) realizaram uma pesquisa no túnel de vento do Instituto de Ciência Industrial da Universidade de Tóquio, a fim de verificar a ventilação em uma edificação alta com abertura abaixo do nível do solo, inserida no meio urbano (figura 2.41). Após analisarem os resultados verificaram que a taxa de ar na base da edificação aumenta quase proporcionalmente à da abertura, e a adoção de duas aberturas, ao invés de uma, com a mesma área total, resulta em arejamento mais eficiente quando se tem abertura em um único lado de ventilação. Quanto ao ângulo de incidência do vento observou-se uma tendência em diminuir o fluxo de ar à medida que aumenta a ocupação ao redor da edificação, devido à formação de barreiras dificultando a entrada do vento.

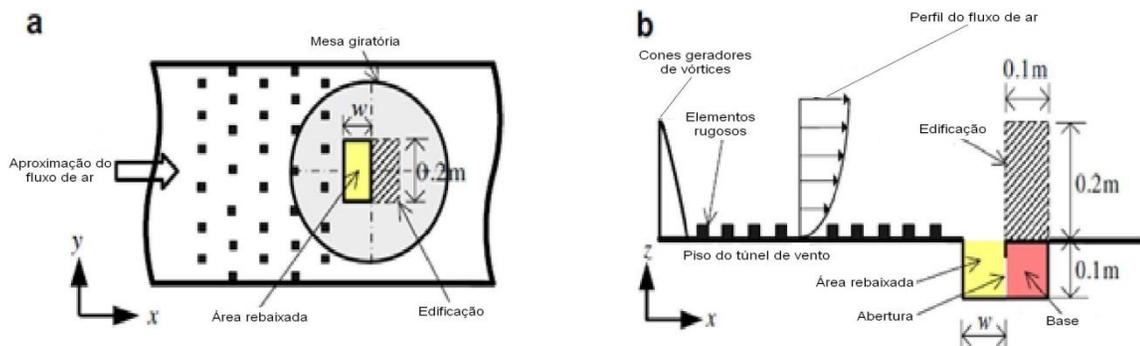


Figura 2.41: Esquema da posição da maquete da edificação no túnel de vento em planta (a) e em corte (b)

Fonte: Adaptado de BU; KATO; TAKAHASHI, 2010

Camargo *et al* (2010) avaliaram a eficiência da ventilação natural dos Hospitais da Rede Sarah localizados nas cidades de Brasília e Belém, utilizando ensaios no túnel de vento e analisaram como a implantação influencia na ventilação natural (figura 2.42). Na comparação dos resultados obtidos para os hospitais de Brasília Lago Norte e de Belém nas posições implantadas, observaram-se velocidades um pouco superiores, produzindo uma diferença na razão média das velocidades de 10,4% maior, para o hospital de Belém. Isto mostrou que o conjunto de aberturas e o sistema de sheds do hospital de Belém, que funciona como extrator de ar, ventilam melhor o interior do que o sistema de aberturas e sheds do hospital de Brasília Lago Norte, que funciona como captador de ar. Observou-se, também, que o posicionamento do hospital de Belém na

direção do vento dominante proporcionaria uma melhoria média, em torno de, 22,8 % na ventilação natural do seu interior.

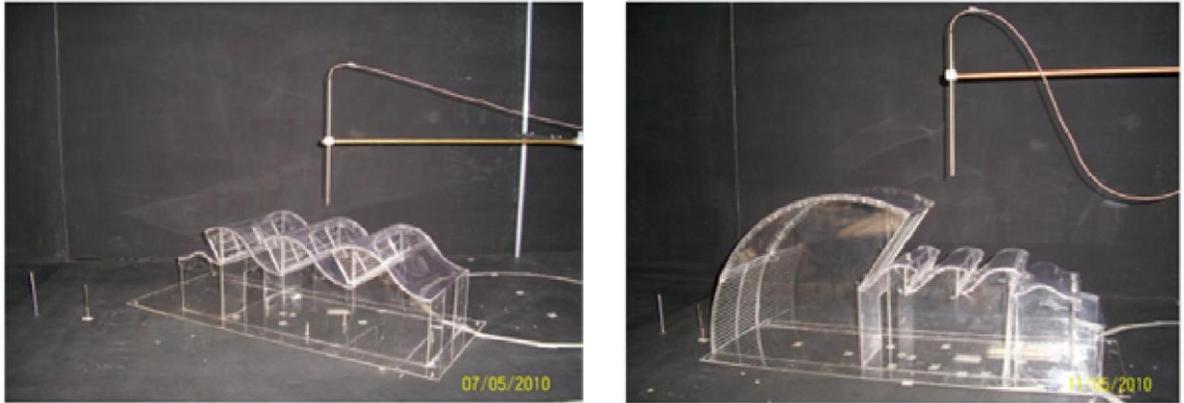


Figura 2.42: Hospitais instrumentados Sarah Lago Norte (esquerda) e Sarah Belém (direita)

Fonte: CAMARGO *et al*, 2010

Chu, Chiu e Wang (2010) pesquisaram a ventilação cruzada em edificações com paredes divisórias utilizando o túnel de vento em condições de escoamento de alta pressão (figura 2.43). Após analisarem os ensaios concluíram que a pressão interna e a taxa de ventilação, tanto medidas quanto previstas, por equações empíricas, apresentam valores semelhantes, independentemente da localização das aberturas internas. Além disso, a taxa de ar atingiu o valor máximo com as áreas das superfícies ventiladas de mesmo valor, mas sempre menor do que a edificação sem divisória, devido à diferença de pressões, diminuindo a ventilação, que pode ser regulada por meio do controle das aberturas internas, de barlavento (entrada do vento) e sota-vento (saída do vento).

Drach, Vasconcellos e Corbella (2010) desenvolveram experimentos didáticos para visualização e análise dos caminhos do vento no espaço urbano. A partir das metodologias propostas identificaram e determinaram as configurações capazes de adequar o projeto ao lugar, tendo como foco a avaliação dos projetos urbanos e paisagísticos, em diferentes arranjos morfológicos. As simulações experimentais em túnel de vento utilizaram técnicas de visualização, entre elas a do arrasto de areia,

sendo que a visualização imediata do efeito do vento no nível do pedestre pode auxiliar os envolvidos no desenho urbano, sobretudo na especificação das variáveis projetuais visando ao conforto dos ambientes externos, como por exemplo, das áreas mais ou menos ventiladas, permitindo, ainda, apontar a possibilidade de formação das ilhas de calor. A simulação computacional contribuiu como outra forma de avaliação para acrescentar dados para o desenvolvimento de um “banco de experimentos” pautados na visualização do que ocorre nos espaços em termos de ventilação e seus resultados foram apresentados pelos campos de vetores e das isofoixas dos campos de vento. Concluíram que para trabalhar em arquitetura e urbanismo bioclimáticos essas medidas passivas auxiliam na redução do consumo de energia e na produção de poluição.

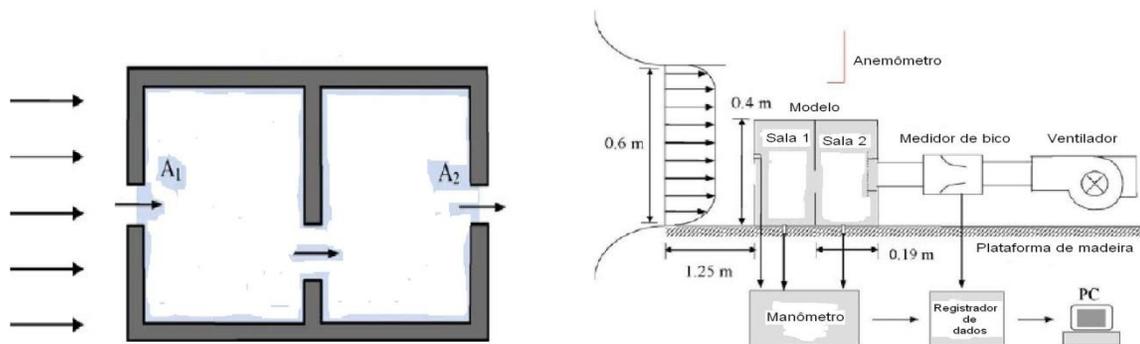


Figura 2.43: Edificação simulada com divisória (esquerda) e seu esquema no túnel de vento (direita)

Fonte: Adaptado de CHU; CHIU; WANG, 2010

Kim, Kim e Kim (2010) analisaram o comportamento da ventilação de um mercado na cidade de Seul, Coreia, com cobertura em arco fechado, por meio de ensaios em túnel de vento e computacional, e também testaram outras alternativas de coberturas, em substituição ao arco, de acordo com a estrutura do mercado e do telhado (figuras 2.44 e 2.45). Na comparação entre os dois ensaios com cobertura em arco perceberam que em cada ponto de medição houve diferenças de 2% a 30% de acordo com a direção do vento, e, nos outros modelos de telhados analisados foi revelada uma elevação nas taxas de troca de ar duas vezes maior nas coberturas plana, duas águas e plana inclinada em relação aos outros. Além disso, aumentando-se a altura do telhado a taxa de troca de ar foi aumentada em cerca de 35%, permitindo concluir que as causas de

baixo fluxo de ar são a altura dos edifícios circundantes, a determinação da estrutura do mercado, o modelo e a altura do telhado e as aberturas de ventilação.

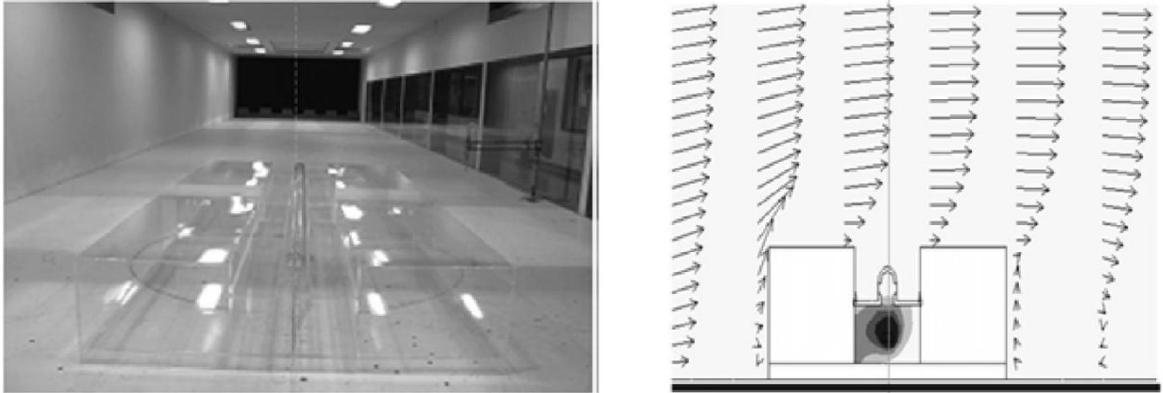


Figura 2.44: Maquete do mercado em simulação no túnel de vento (esquerda) e computacional (direita)

Fonte: KIM; KIM; KIM, 2010

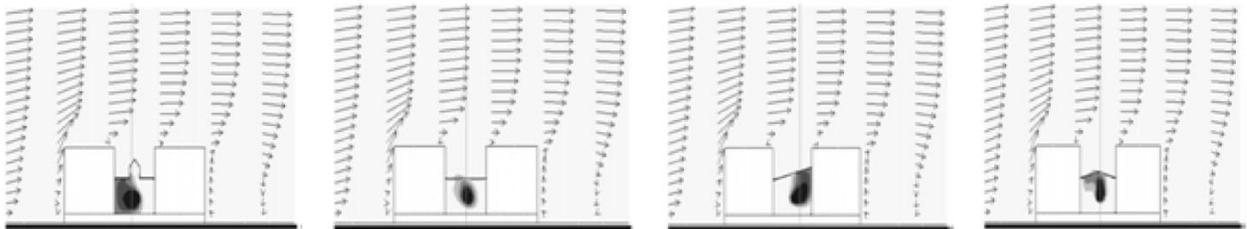


Figura 2.45: Modelos de coberturas analisadas em simulação computacional

Fonte: KIM; KIM; KIM, 2010

Liu *et al* (2010) simularam no túnel de vento da Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong uma edificação em forma de cruz (figura 2.46), para verificar o comportamento desta quanto à eliminação de poluentes, dispersos ao seu redor, utilizando a ventilação. Verificou-se que o condicionamento pode ser complicado, devido à forte interação entre o vento se aproximando e a forma de construção complexa, pois os poluentes podem se espalhar verticalmente, não só no sentido ascendente como foi encontrado sob efeito de flutuação, mas também no sentido descendente. Além disso, a dispersão também pode ocorrer no sentido horizontal, indicando um risco potencial de contaminação cruzada entre os apartamentos horizontais adjacentes. Notou-se, também, que a rota de dispersão deste estudo é

bastante sensível a fonte de localização e direção do vento, podendo-se esperar que o ângulo de incidência afeta fortemente o padrão de fluxo de ar ao redor do prédio e consequentemente a sua qualidade.



Figura 2.46: Edificação simulada no túnel de vento

Fonte: LIU *et al*, 2010

Bady *et al* (2011) estudaram a ventilação no meio urbano e sua relação com a dispersão de poluentes por meio de maquetes inseridas no túnel de vento da Universidade de Tóquio, dividindo as configurações em quatro modelos (figura 2.47). Posteriormente à análise dos resultados concluíram que o modelo (I) é uma boa escolha para matrizes urbanas densamente povoadas, pois a presença de lacunas entre edifícios adjacentes é um fator muito importante a ser considerado pelos urbanistas, aumentando a capacidade de introduzir mais vento para domínios urbanos, onde a qualidade do ar é melhorada.

Chu, Chen e Chen (2011) analisaram simulações realizadas em túnel de vento para estudar o cisalhamento do vento (vento paralelo em relação às aberturas) em edificações com uma e duas aberturas dispostas em faces paralelas (figura 2.48). Os resultados revelaram que a taxa de ventilação na abertura de cisalhamento independe da velocidade do vento e da área de abertura. Além disso, a influência da direção do vento sobre as taxas de ar foi investigada, as quais atingiram valor máximo na direção

do vento entre 45° e $67,5^\circ$, porque o ar fresco é mais fácil entrar na abertura quando existe um ângulo oblíquo entre a abertura da fachada e a direção do vento, e, são maiores na edificação com duas aberturas, o mesmo ocorrendo quanto às diferenças entre as pressões interna e externa.

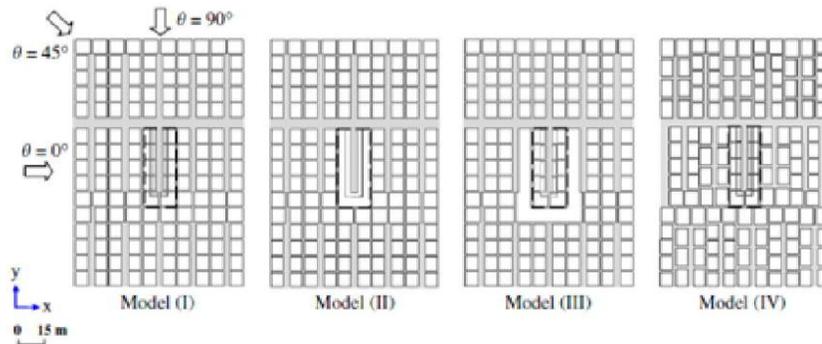


Figura 2.47: Esquema dos quatro modelos testados no túnel de vento

Fonte: BADY *et al*, 2011

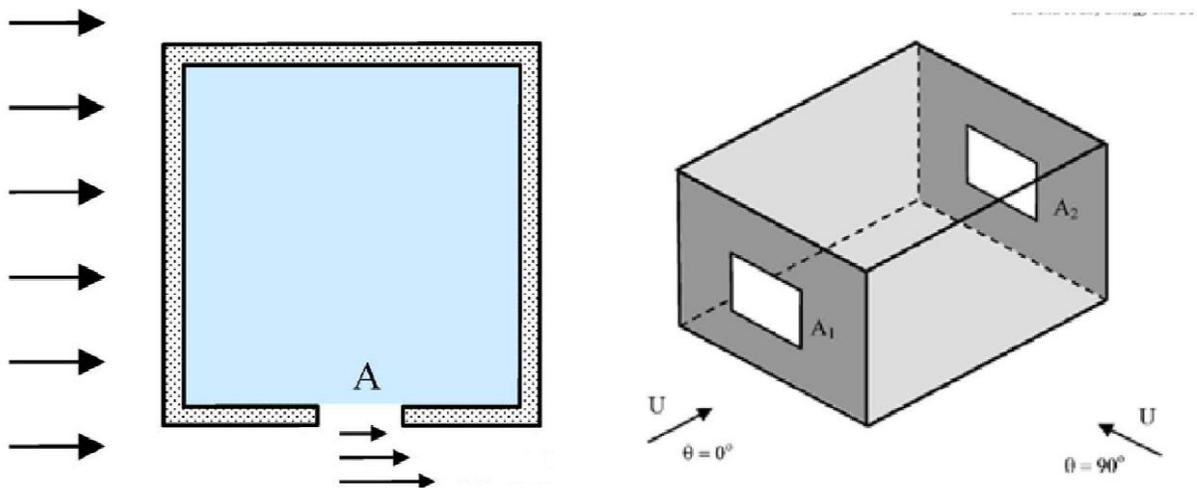


Figura 2.48: Edificação com uma abertura (esquerda) e duas aberturas (direita)

Fonte: CHU; CHEN; CHEN, 2011

Ji *et al* (2011) investigaram a ventilação cruzada em uma maquete inserida no túnel de vento do Instituto de Ciência Industrial da Universidade de Tóquio, utilizando o etileno como gás rastreador, sensores FID (Detector de Ionização de Chama), para monitorar a concentração do gás, e o método DFR (Taxa de Fluxo Diluído) na avaliação do desempenho da ventilação deste experimento (figura 2.49). Após a análise das

simulações no túnel concluíram que a direção do vento é flutuante o tempo todo e isso influencia o comportamento da ventilação significativamente. As DFRs dos casos flutuantes variam de 65% a 100% da máxima taxa de fluxo de ar, e essa variação está relacionada às dimensões da abertura e velocidade do vento.

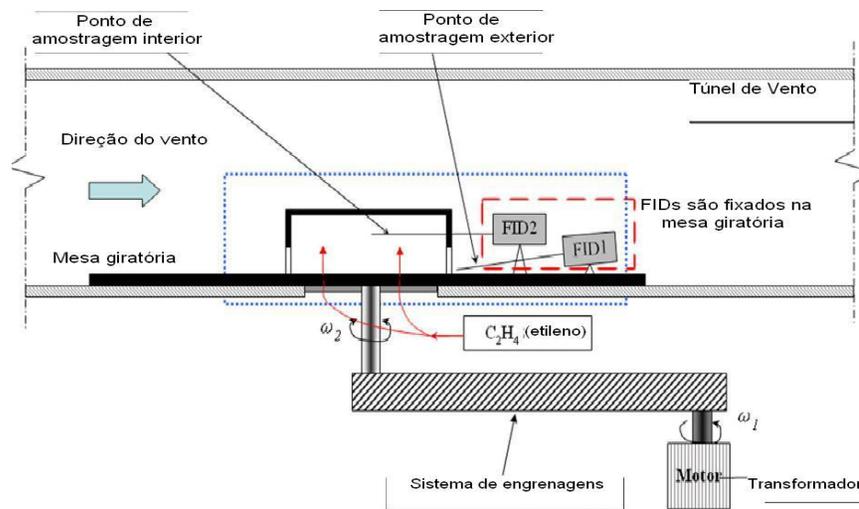


Figura 2.49: Esquema da maquete e sensores no túnel de vento

Fonte: Adaptado de JI *et al*, 2011

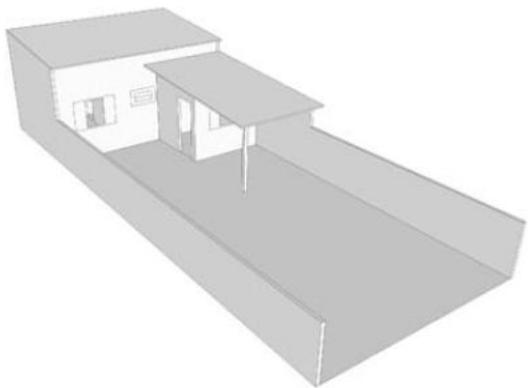
Kosmar (2011) realizou três ensaios, em escala urbana, para verificar a ventilação natural em áreas rurais, suburbanas e urbanas, utilizando ensaios no túnel de vento de camada limite atmosférica da Universidade Técnica de Munique, Alemanha, onde foram utilizados geradores de vórtice e elementos de rugosidade de superfície. Os resultados experimentais foram comparados com modelos teóricos, mostrando que a média dos perfis de velocidade nas áreas analisadas estava em concordância com as leis da teoria aerodinâmica, sendo que a densidade das flutuações de velocidade longitudinal e a inércia indicam que este túnel de vento pode ser empregado com sucesso em um amplo espectro de engenharia, estudos ambientais, e micrometeorologia, ou seja, onde é necessário reproduzir com precisão as características de camada limite atmosférica.

Labaki *et al* (2011) observaram que casas auto-construídas são geralmente pequenas inicialmente, mas são frequentemente sujeitas a modificações realizadas sem qualquer atenção adequada à ventilação interna, e, por esse motivo analisaram a influência

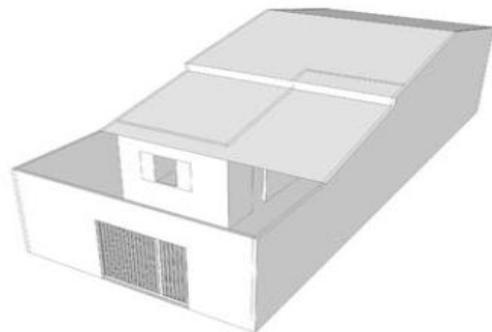
dessas mudanças de projeto em duas edificações localizadas na cidade de Campinas (SP) por meio de medições da velocidade do ar em túnel de vento. Em cada caso, a análise começou com a situação inicial e, em seguida, procedeu à determinação do impacto das reformas, testando quatro modelos físicos (figura 2.50). As medições foram realizadas em um ponto fora e em cinco pontos no interior dos modelos, para diferentes ângulos do vento incidente. Os resultados mostraram que modificações em uma casa auto-construída podem prejudicar significativamente o movimento do ar interno, devido à recirculação de bloqueio. Na segunda casa, onde um telhado foi adicionado no recuo frontal, uma melhora foi observada apenas no ponto interno mais próximo à fachada, mas a circulação interna foi realmente reduzida. Em conclusão, o pequeno tamanho e a forma dos lotes nos assentamentos de habitação social não permitem o correto posicionamento e orientação das aberturas. Este estudo indica que edificações auto-construídas devem estar cientes das consequências negativas das alterações. Para minimizar este problema, sugere-se que o setor público implemente programas de assistência do projeto para a população de baixa renda. Edifícios de baixo custo, destinadas a famílias de baixa renda, devem utilizar estratégias de resfriamento passivo, a fim de melhorar as condições ambientais internas.

Prata, Celani e Frota (2011) apresentaram técnicas para a construção de modelos físicos utilizados em estudos de caso (para cidade de Santos e São Paulo) para conhecer as características da ventilação urbana de uma dada região; bem como as técnicas utilizadas nos ensaios em túnel de vento, tendo como objetivo verificar a possibilidade de compreender a situação atual e avaliar alternativas de intervenção dos cenários estudados. Analisando as técnicas concluíram que o modelo físico, como forma de aprendizado e reconhecimento de verificação de estratégia de tomada de decisão projetual, permite a verificação de características projetuais em estágio atual e possibilita o desenvolvimento de alterações futuras. No que se refere à produção do modelo, o uso da prototipagem rápida permitiu que se obtivesse uma excelente precisão dimensional e rapidez na execução. Além disso, foi possível perceber que o uso dessa tecnologia poderia ser mais explorado nos ensaios com maquetes arquitetônicas em túnel de vento, pois permite a reprodução de detalhes e texturas que

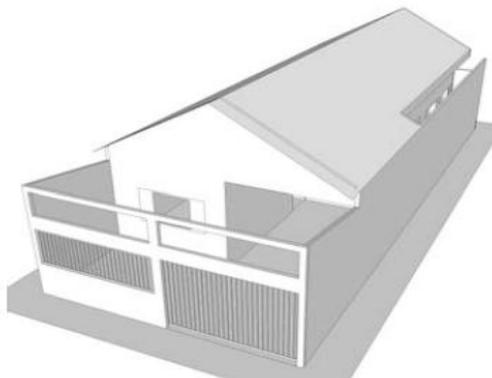
são normalmente omitidos em consequência da dificuldade de produção das maquetes em escalas muito reduzidas e de forma “tradicional”. O resultado dos ensaios em modelos físicos auxilia na percepção do espaço, quanto à ventilação natural, permitindo o entendimento de questões como conforto do pedestre, dispersão de poluentes; bem como a qualidade interna dos edifícios. Estes resultados são obtidos por técnicas de simulação, conforme o objetivo que se deseja atingir, seja para o ambiente urbano (grupo de edifícios, espaços abertos, etc) como para o edifício isolado (posição, forma geométrica, aberturas, etc). Desta forma, o projetista pode precisar suas tomadas de decisões.



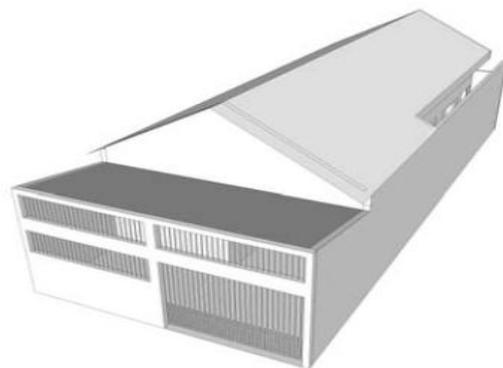
Modelo 1: Projeto Inicial



Modelo 1: Projeto Modificado



Modelo 2: Projeto Inicial



Modelo 2: Projeto Modificado

Figura 2.50: Modelos ensaiados no túnel de vento

Fonte: LABAKI *et al*, 2011

Wang, Etheridge e Ohba (2011a) analisaram a ventilação em uma edificação com quatro dutos acoplados em sua cobertura (figura 2.51) utilizando ensaios em túnel de

vento e modelos matemáticos, nas Universidades de Tóquio e Nottingham, para determinar a pressão superficial, magnitude e direção do fluxo de ar. Posteriormente às medições concluíram que em termos de taxa de ventilação, os resultados dos testes com fio quente indicam uma incerteza de cerca de 10%, quando comparado com outras técnicas menos abrangentes (por exemplo, teste do gás traçador), e, os coeficientes de pressão externa para uma série de configurações de abertura nos dutos revelaram que os valores para as janelas eram independentes da configuração dessas aberturas (é o esperado para pequenas aberturas). Além disso, considerando as direções de vento, os coeficientes de pressão externa para os dutos foram sempre negativos. Isto obviamente não significa que os fluxos nos dutos seriam sempre para cima, uma vez que estes dependem do número total de aberturas.

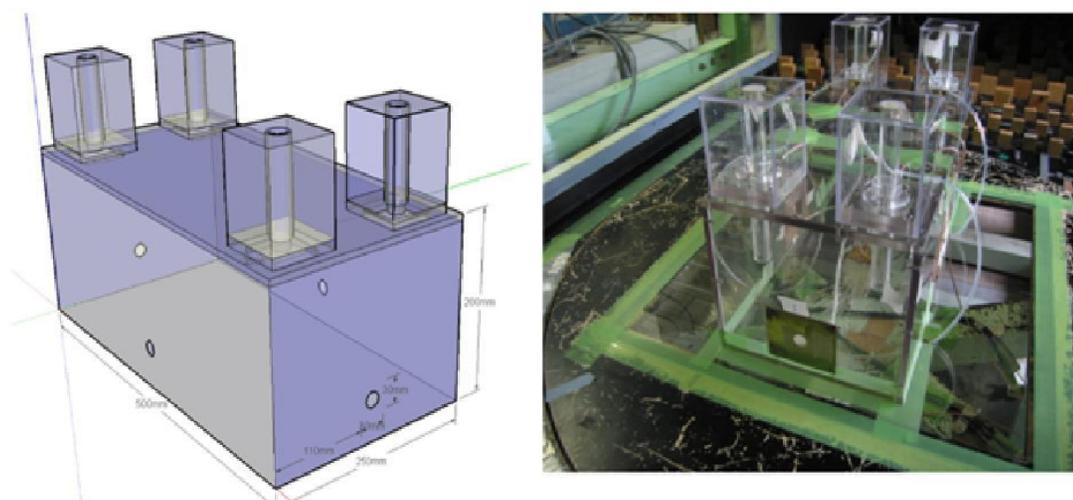


Figura 2.51: Maquete da edificação com quatro dutos e os sensores no túnel de vento

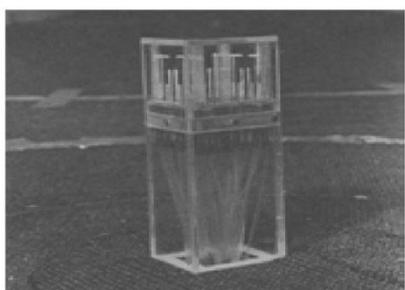
Fonte: WANG; ETHERIDGE; OHBA, 2011a

Wang, Etheridge e Ohba (2011b) na continuação da pesquisa anterior (2011a) verificaram o equilíbrio dos fluxos, a distribuição da pressão externa e compararam as medidas experimentais com os modelos teóricos. Os resultados confirmaram a importância da distribuição da pressão externa sobre a ocorrência de inversão de fluxo. Em particular, para todas as configurações de abertura testadas, a reversão de fluxo foi observada por pelo menos uma direção do vento. As vantagens da medição direta da

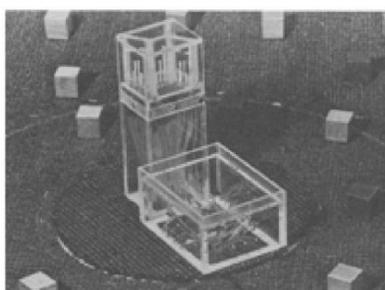
inversão de fluxo em um modelo de túnel de vento são que os efeitos de turbulência estão presentes nos resultados e que as medidas de pressão não são exigidas.

2.3. Ensaio de Torre de Vento em Túnel de Vento

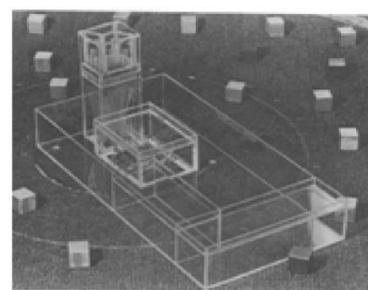
Karakatsanis, Bahadori e Vickery (1986) simularam no túnel de vento da Universidade de Ontario, Canadá, uma torre de vento com maquetes em acrílico, escala 1:70, para a determinação dos coeficientes de pressão nas aberturas de entrada e saída de ar, por meio de três diferentes configurações (figura 2.52). Durante as simulações, as maquetes foram variando suas posições, e após a análise dos resultados concluíram que a taxa de fluxo de ar depende da presença de barreiras nas aberturas (caso 3), diminuindo a velocidade do ar, fazendo com que os valores dos coeficientes de pressão sejam baixos ao contrário de edificações livres de barreiras (caso 2). Dependendo do ângulo formado entre a direção do vento e da edificação, a torre atuará como um dispositivo de sucção (ar fluirá da casa para a torre), além disso, quando a abertura de saída de ar estiver obstruída, a taxa de fluxo de ar da torre para a casa será maior.



Caso 1: Torre isolada



Caso 2: Torre com edificação



Caso 3: Torre com edificação e pátio

Figura 2.52: Configurações testadas no túnel de vento

Fonte: KARAKATSANIS; BAHADORI; VICKERY, 1986

Battle, Zanchetta e Heath (2000) analisaram um estudo feito no túnel de vento do Imperial College, Londres, onde foram testadas maquetes de cinco tipos de captadores de vento em uma mesma edificação, na escala 1:50, e sua relação com o meio urbano (figura 2.53).

Realizaram-se os ensaios enfatizando diversas variáveis, cujos resultados estão resumidos na tabela 2.8.

Al-Shaali (2002) realizou uma pesquisa para projetar uma torre de vento adequada ao clima das cidades de Abu Dhabi e Al-Ain, situadas nos Emirados Árabes Unidos, caracterizado por temperaturas e umidade relativa altas. Para esse estudo foram construídas maquetes de acrílico, escala 1:48, com diferentes tipologias, testadas em uma mesa com um ventilador e sensores de velocidade do ar, simulando um túnel de vento (figuras 2.54, 2.55 e 2.56).

Após a montagem dos equipamentos foram realizadas as simulações, combinando cada abertura de entrada com cada abertura de saída de ar, sendo 1,5, 2,3 e 3,1m/s as velocidades de vento testadas. Os resultados indicaram que a abertura de saída com barreira posicionada na base da abertura proporcionou um melhor desempenho em relação às outras para todos os casos de abertura de entrada, pois pode ser adaptada para ser usada como uma entrada de ar quando o vento está soprando em outra direção. Outra observação importante é que o menor captador de vento deve localizar-se na fachada oeste da edificação para reduzir o calor gerado a partir do sol da tarde sobre essa fachada, diminuindo a temperatura da superfície dessa parede.

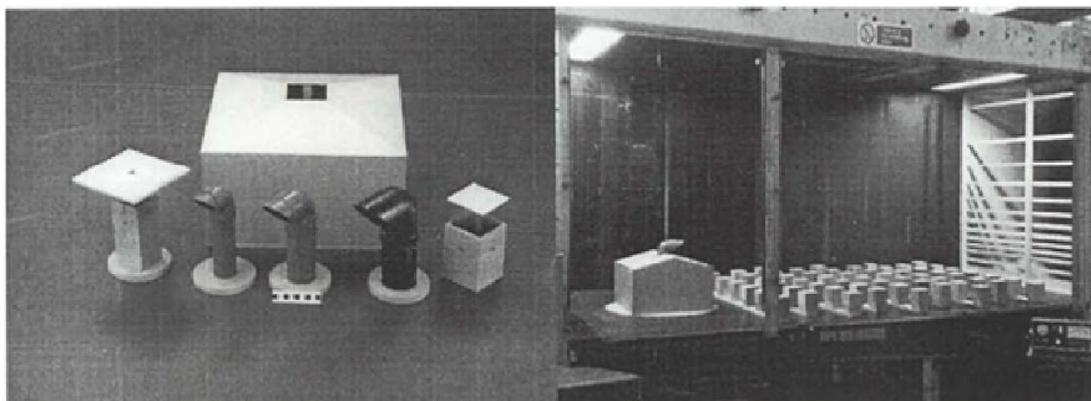


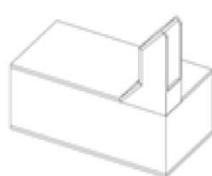
Figura 2.53: Maquetes testadas no túnel de vento (esquerda) e o arranjo no túnel de vento (direita)

Fonte: BATTLE; ZANCHETTA; HEATH, 2000

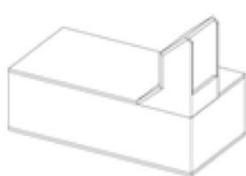
Tabela 2.8: Variáveis testadas nos captadores e os resultados

Variáveis	Resultados
Altura	Quanto maior a altura do captador, maior o desempenho da ventilação.
Aberturas	Não há variação entre a pressão e as dimensões das aberturas dos captadores.
Posição	Os captadores são mais eficazes quando colocados na borda do edifício onde há entrada de ar, o qual deve estar a 45° em relação ao vento.
Forma da cobertura da edificação	A edificação com cobertura piramidal aumentou o desempenho dos captadores, mas como no item anterior, deve estar a 45° em relação ao vento.
Ângulo do dispositivo	Os captadores de um lado têm um bom desempenho quando posicionados até 30° em relação ao vento, e, a partir de 90° perdem sua eficiência, ao contrário dos captadores de dois lados que são mais eficazes a 90°.
Entrada e saída de ar	A edificação e o captador posicionados a 0° em relação ao vento provoca maior pressão na entrada e menor na saída, e a 45° ocorre o oposto.

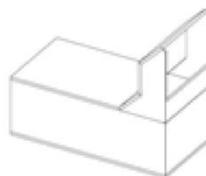
Fonte: BATTLE; ZANCHETTA; HEATH, 2000



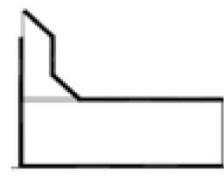
Abertura de entrada ocupa 1/3 da fachada frontal



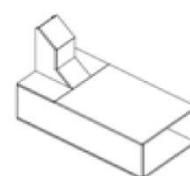
Abertura de entrada ocupa 1/2 da fachada frontal



Abertura de entrada ocupa toda fachada frontal



Abertura de entrada reduzida em 60%



A abertura de entrada que ocupa 1/3 da fachada frontal é posicionada no centro

Figura 2.54: Tipologias de torres analisadas

Fonte: AL-SHAALI, 2002

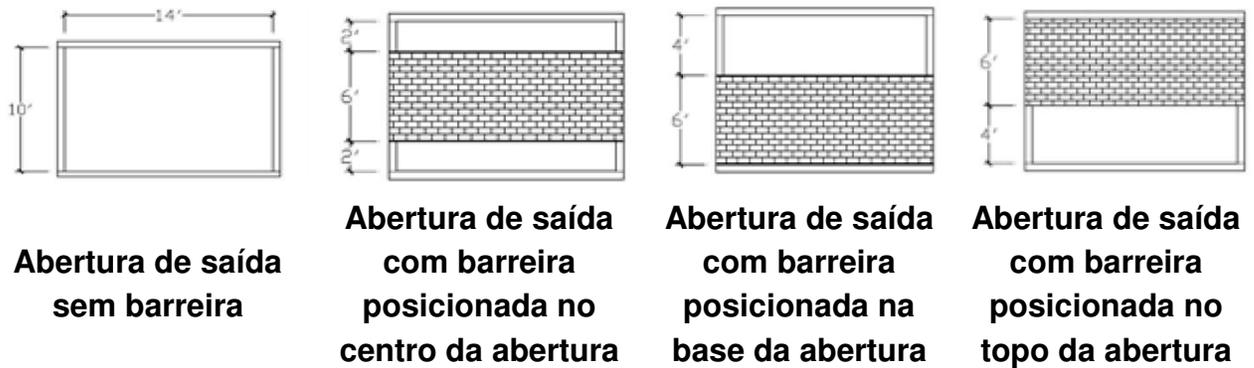


Figura 2.55: Tipologias das aberturas de saída de ar

Fonte: AL-SHAALI, 2002

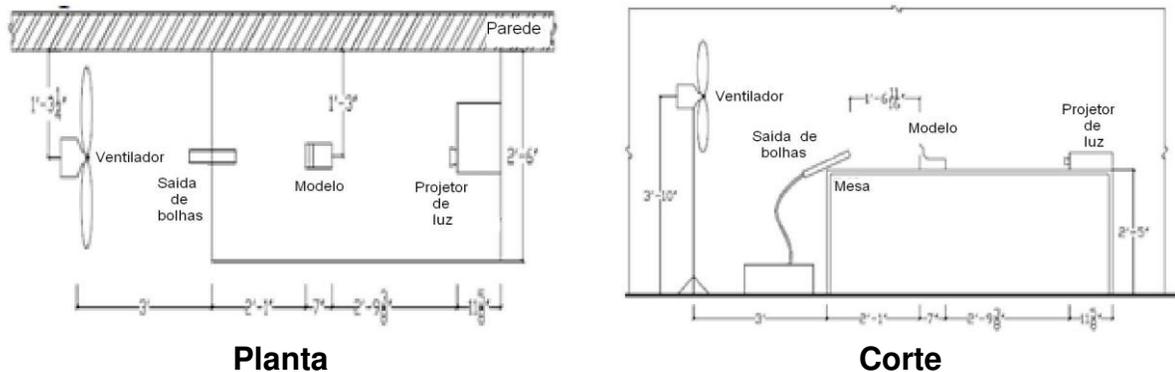


Figura 2.56: Esquema da montagem para verificação da ventilação nas maquetes

Fonte: Adaptado de AL-SHAALI, 2002

Montazeri e Azizian (2008) investigaram o desempenho hidrodinâmico de uma torre de vento unidirecional, acoplada a uma edificação, utilizando ensaio em uma maquete de madeira, escala 1:40, no túnel de vento, com visualização de fumaça, da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade de Yazd, Irã (figura 2.57). Após a realização do experimento com velocidade do ar a 7m/s e variação da posição da torre em diferentes ângulos, concluíram que a taxa de fluxo de ar da torre depende dos coeficientes de pressão na abertura da torre, os quais variam consideravelmente com o ângulo de incidência do ar, e quanto maior o ângulo menor será a eficiência da ventilação natural na edificação. Assim, a ventilação atingirá sua eficiência máxima com a torre a 0°,

desde que não haja barreiras que impeçam ou desviem o fluxo de ar da abertura de entrada da torre.

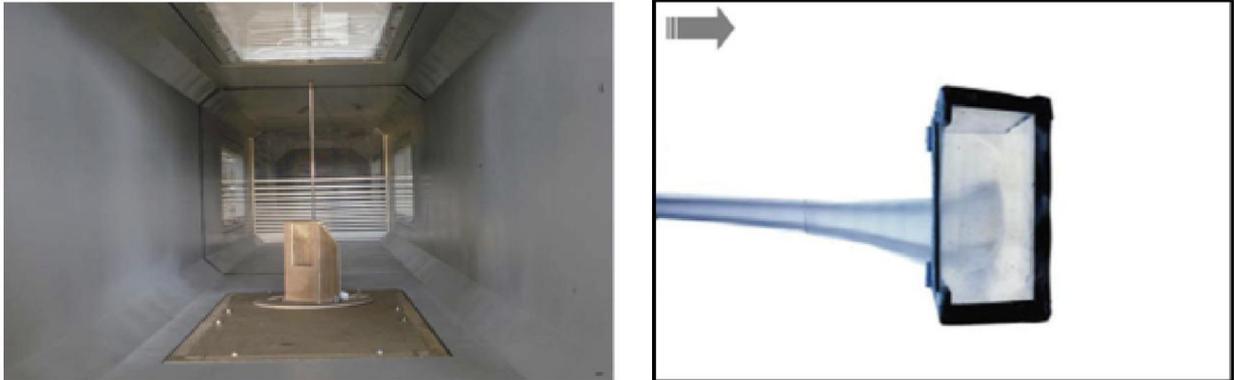


Figura 2.57: Maquete em madeira da torre com a edificação no interior do túnel de vento (esquerda) e Teste de fumaça (adaptado) com a torre a 0° em relação ao vento (direita)

Fonte: MONTAZERI; AZIZIAN, 2008

Attia e Herde (2009) realizaram uma simulação de *malqaf* (espécie de captador de vento utilizado na antiguidade), por meio de uma maquete de acrílico na escala 1:20, no túnel de vento da Unidade de Termodinâmica da Escola de Engenharia da Universidade Católica de Louvain na Bélgica (figura 2.58). Foram analisados os fluxos de ar no *malqaf* em edificação simples com visualizações de fumaça no túnel de vento, simulando-os com baixo valor de velocidade do ar (2m/s).

As simulações desenvolvidas consideraram vários parâmetros de projeto, como a posição da edificação em relação à direção do vento, o tamanho e tipo das aberturas de entrada e saída de ar, sendo que os resultados mais significativos encontram-se na tabela 2.9.

Percebe-se que a melhor situação é a S3, a qual oferece a maior taxa de renovação de ar (5,6 ren/h), sendo isso o resultado da melhor configuração, pois a edificação possui dois *malqafs*, um como barlavento e outro como sota-vento, orientados com posições contrárias, mostrando que essa alternativa sustentável de ventilação de interiores pode ser adotada em locais de clima quente.

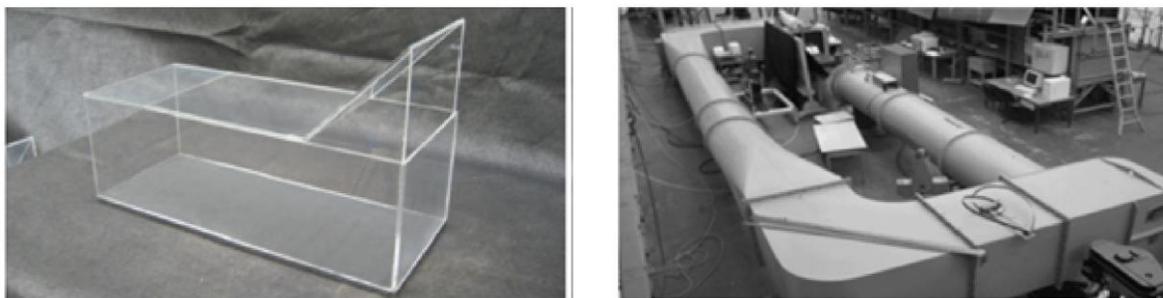


Figura 2.58: Maquete em acrílico da edificação com o *malqaf* (esquerda) e Túnel de Vento da Universidade de Louvain (direita)

Fonte: ATTIA; HERDE, 2009

Tabela 2.9: Resumo das simulações realizadas

Situação	Esquema	Abertura de Saída em Relação à Parede	Velocidade medida (m/s)	Renovação de Ar (/h)
S1a			0,4	1,7
S1b			0,6	2,0
S2a			0,6	4,0
S2b			1	3,4
S2c			0,4	2,4
S3			-	5,6
S4			-	4,8

Fonte: ATTIA; HERDE, 2009

Montazeri (2011) investigou o desempenho de ventilação natural em edificações com captadores de vento, utilizando simulação computacional (software Fluent[®]) e testes de visualização de fumaça no túnel de vento do Laboratório da Escola de Engenharia Mecânica da Universidade de Yazd, Irã. Para atingir esse objetivo, cinco modelos cilíndricos com áreas de mesma seção transversal e altura foram empregados e divididos internamente em diversos segmentos para obter captadores de dois, três, quatro, seis e doze lados (figura 2.59), e medidos em diferentes ângulos de incidência de ar. Os resultados indicaram que a taxa de ar diminui quanto maior o número de aberturas, sendo o captador de dois lados mais eficiente quando posicionado em um ângulo de 0° em relação ao vento. Observou-se também uma redução no fluxo de ar (quatro vezes menor) para o interior da edificação quando comparado com captadores de seção retangular, o qual possui eficiência 13% maior que os circulares. Quanto à simulação computacional houve boa concordância com o túnel, que apresentou alguns erros de medição devido à sensibilidade direcional das sondas em diferentes direções do vento.

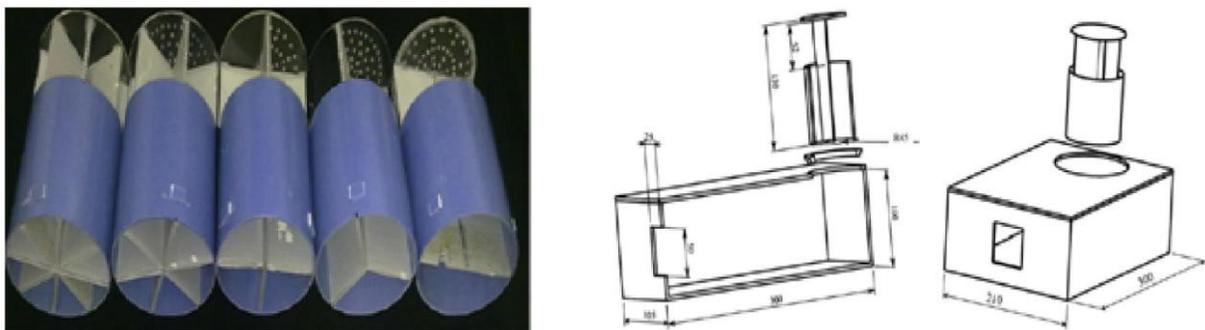


Figura 2.59: Captadores de vento de seção circular (esquerda) e esquema da ligação na edificação (direita)

Fonte: MONTAZERI, 2011

2.4. Simulações em CFD: Software CFX[®]

2.4.1. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Para Fortuna (2000) o método de simulação numérica aplicado às áreas de Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor, conhecido por CFD (“Computational Fluid Dynamic”) ou DFC (“Dinâmica de Fluidos Computacional”) é a área da computação

científica que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor. Isso inclui tanto o movimento de fluidos ao redor de um corpo como dentro de tubulações e turbinas. Basicamente, o usuário de DFC está interessado em obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento.

O objetivo básico da DFC é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática. Utilizando as técnicas de DFC, pode-se avaliar numericamente os diversos parâmetros relevantes ao problema. Esses podem ser facilmente alterados até que o resultado da simulação atenda às exigências do projeto. Tudo isso de forma bem mais conveniente e a custos e tempos menores do que apenas utilizando técnicas experimentais e análises teóricas, combinadas com projeto inicial, ensaios e reprojeto. Atualmente é uma ferramenta poderosa para a solução de problemas, nestas e em outras áreas do conhecimento científico ou tecnológico.

CFX®: Definição

Segundo Oliveira, Mariano e Quadri (2009) o pacote computacional ANSYS CFX® é um software de simulação para resolução numérica de problemas envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor (CFD). O programa emprega a metodologia de volumes finitos utilizando estruturas espaciais e gerando malhas correspondentes.

2.4.2. CFD e Conforto Térmico

Lu, Howarth e Jeary (1997) realizaram uma simulação no software CFDS-Flow3D®, baseado na CFD, para verificar o fluxo de ar e o campo de temperatura de uma sala aquecida por um radiador (figura 2.60), no qual é apresentado também o rastreamento de movimento de partículas poluentes. Posteriormente à análise dos resultados concluíram que a CFD proporciona resultados satisfatórios, pois pôde ser visto que o jato de parede térmica criado por um radiador influencia o padrão de fluxo de ar, temperatura e distribuição de partículas poluentes na sala aquecida, e a área próxima a

fonte de calor tem um alto risco de contaminação pelo ar impondo um efeito nocivo sobre o ocupante.

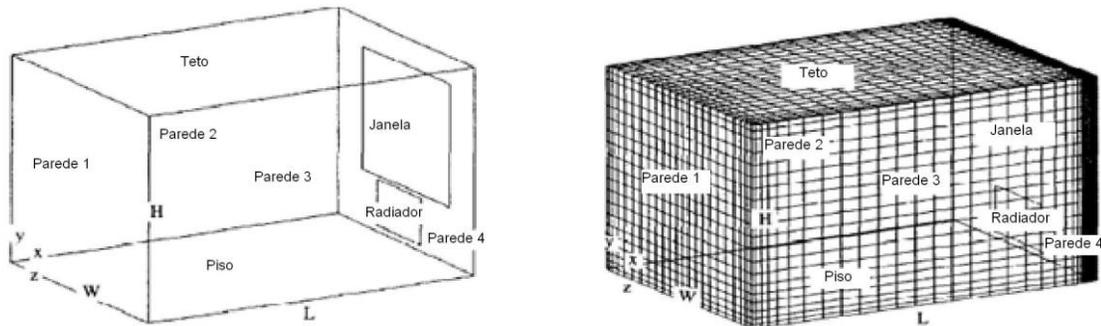


Figura 2.60: Configuração geométrica da sala analisada (esquerda) e o esquema da malha (direita)

Fonte: Adaptado de LU; HOWARTH; JEARY, 1997

Bittencourt e Lobo (1999) analisaram o efeito conjunto da localização e dimensão das aberturas na ventilação natural de edificações escolares no município de Maceió. Para isso, foram realizadas simulações de uma sala de aula típica com diferentes localizações e dimensões de aberturas, utilizando o programa computacional Phoenics 2.2.2[®], baseado na CFD (Computer Fluid Dynamics). Quanto à localização das aberturas, foram definidas três posições (faixas) nas paredes que as contêm e, em relação à dimensão, foram definidos quatro tamanhos.

Os resultados das simulações são apresentados em forma de vetores, possibilitando a visualização da direção e intensidade (velocidade) do fluxo de ar nos modelos estudados, fato que não ocorre nos métodos tradicionais que usam o túnel de vento como instrumento de investigação, observando-se que, quando as aberturas de entrada do fluxo de ar se encontram na faixa média e as aberturas de saída na faixa alta, associadas a uma maior dimensão das aberturas, obtém-se um melhor padrão de circulação do ar no interior do ambiente. Nesses casos, com ventos externos de 3m/s, o fluxo de ar apresenta uma velocidade média em torno de 2m/s no nível dos usuários, e a mínima observada é de 0,4m/s no nível do solo, evitando que a poeira ao nível do solo atinja os estudantes.

Como já era esperado, a situação mais desfavorável foi verificada quando ambas as aberturas (de entrada e saída do fluxo) estão posicionadas na faixa alta das paredes, pois o fluxo fica praticamente canalizado próximo ao teto, acima do nível dos usuários, gerando áreas onde a circulação do ar é reduzida. Nesse caso, a velocidade do fluxo na altura das aberturas chega a atingir 4m/s (com incidência do vento perpendicular à abertura), porém, na altura do usuário, a média é de apenas 0,3m/s, com regiões de ar estagnado. Nesta configuração, embora os resultados sejam desfavoráveis no que tange ao resfriamento fisiológico, podem ser interessantes do ponto de vista do resfriamento do teto, já que, nas regiões equatoriais, uma parcela significativa de radiação solar atinge a cobertura dos edifícios.

Verificou-se, ainda, que as maiores velocidades do fluxo de ar no interior das salas de aula foram conseguidas com a incidência de vento a 90° (perpendicular) em relação às aberturas, apesar dos modelos com incidência de vento a 45° também apresentarem, em sua maioria, distribuição do fluxo com velocidades satisfatórias. Concluiu-se que a localização das aberturas exerce maior influência sobre o padrão de distribuição do ar das salas de aula do que a variação da dimensão das mesmas.

Bittencourt e Peixoto (1999), visando estudar o efeito da forma das envazaduras na ventilação natural, realizaram simulações de uma sala de aula típica com diferentes combinações entre forma (horizontal, quadrada e vertical) e posição (altura baixa, média e alta da parede) das aberturas utilizando o programa computacional Phoenics 2.2.2[®]. Estudando os modelos, verificou-se que as aberturas de entrada do fluxo de ar no formato horizontal, localizadas na faixa média e conjugadas às saídas na faixa alta, apresentam melhor resultado. Isso porque propiciam uma distribuição do fluxo de ar mais uniforme no ambiente, com velocidade média um pouco abaixo de 2m/s. Esse valor encontra-se entre o aceitável na ventilação de interiores, que varia de 0,5 a 2,5m/s, de acordo com diversos autores. A situação menos favorável é observada quando a abertura possui forma vertical, pois, nessa condição, ocorre uma diferença da distribuição do fluxo de ar nos diversos pontos do ambiente. Nas proximidades da abertura, a ventilação é satisfatória, porém nas outras áreas, a circulação de ar é

deficiente, com velocidades do fluxo de ar entre 0,2 e 0,4m/s na altura dos usuários, o que não é suficiente para produzir um resfriamento fisiológico. Os resultados apresentados mostram que a localização das envazaduras exerce mais influência sobre a circulação do ar no interior de edificações escolares do que a variação da forma das mesmas.

Peren, Greco e Caram (2007), realizaram uma pesquisa visando ilustrar a influência da forma arquitetônica, por meio da rede de hospitais Sarah Kubitschek, na obtenção de uma eficiente ventilação natural, por meio da conjugação dinâmica dos ventos e do efeito de sucção, além de verificar tais aspectos simulando, por meio do software CFX[®], os efeitos de uma ventilação natural (figura 2.61).

No modelo de Salvador, observa-se que o vento sofre uma aceleração na parte superior do *shed*, sendo o ponto tangente ao plano superior o de maior velocidade. Nesse ponto a pressão estática é mínima, de maneira que, esse setor do *shed* seria ideal para posicionar uma abertura para saída do ar. Lembrando que as aberturas devem estar posicionadas nos pontos de pressão máxima ou mínima.

Colocar uma abertura na parte superior do *shed* (no ponto de pressão mínima) provocaria uma maior vazão devido ao diferencial entre pressão interna e externa. Entretanto, não seria favorável em termos de conforto térmico, pois permitiria a entrada direta da radiação solar. Observa-se também que o formato curvo no final do *shed* direciona o vento para baixo, em sentido quase perpendicular à face superior do *shed* seguinte, gerando-se uma zona de turbulência. Cria-se uma área de alta pressão (baixa velocidade) e de divisão do fluxo, onde uma parte acompanha a superfície do *shed* seguinte e, a outra, cria um refluxo para dentro do ambiente.

Essa situação intensifica-se no próximo *shed*. No lugar de sair, existe um fluxo de ar que entra, situação que deverá ser melhor analisada. Essa situação não deve acontecer no modelo de Fortaleza assim como de fato não aconteceu no modelo do Tribunal Regional da Bahia. No modelo de Fortaleza as superfícies da parte superior e inferior da abertura do *shed* são praticamente paralelas. A junção em “Y” dos *sheds*, no

entanto, pode reduzir o efeito de sucção se estiver próxima da abertura. Já no formato do *shed* do Tribunal Regional da Bahia essa junção “Y” não existe, porém apresenta um melhor resultado. O refluxo apresentado no modelo A de Salvador não aconteceu no modelo do Tribunal Regional da Bahia. Conforme comentado anteriormente, a forma do *shed* de Fortaleza procura reduzir a reflexão de calor para dentro do mesmo.

O terceiro modelo, desenvolvido mais recentemente e utilizado no Tribunal Eleitoral Regional da Bahia, é uma combinação do primeiro e segundo. Devido a seu formato, esse modelo deve apresentar o melhor desempenho. O Tribunal Regional Eleitoral da Bahia, devido a sua superfície mais suave, o desempenho do *shed* é mais favorável. Quando a forma é mais aerodinâmica, não apresentando interrupções ou obstáculos, a velocidade do fluxo de ar é maior.

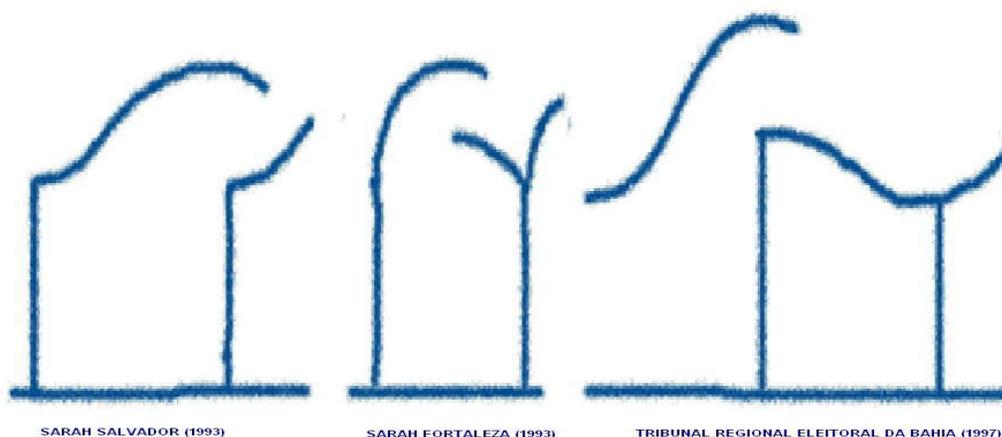


Figura 2.61: Esquema das coberturas analisadas

Fonte: PEREN; GRECO; CARAM, 2007

Cóstola e Alucci (2009) realizaram uma pesquisa destinada a avaliar a viabilidade do uso de simulações de CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) para a obtenção de C_p (coeficiente de pressão), assim como a importância na configuração das simulações. Com base em uma boa revisão bibliográfica foram realizadas 86 simulações, considerando diversas opções de dados de entrada e configurações. Como estudo de caso, adotou-se um edifício isolado de cinco pavimentos, tipicamente utilizado em projetos de habitação de interesse social (HIS) no Brasil.

A primeira conclusão deste trabalho remete a variação nos resultados encontrados na simulação de CFD em função dos parâmetros de entrada. Neste sentido, a divulgação ou utilização de resultados de CFD sem os respectivos dados de entrada se mostra pouco recomendável. Somente acompanhados da respectiva análise de independência da malha, modelo de turbulência utilizado, ordem da discretização e outros parâmetros é possível avaliar a qualidade e confiabilidade dos resultados fornecidos pela simulação de CFD.

A segunda conclusão aponta para a necessidade de adoção de procedimentos para aumentar a produtividade no uso do CFD.

Motezukie e Cheng (2009a), pesquisaram um método de análise da ventilação baseado no uso de um banco de dados de resultados de simulações sintetizados na forma de índice de ventilação para agilizar a tomada de decisão, ainda na etapa de projeto, quanto à adequação do posicionamento das aberturas no quesito de ventilação e possíveis alterações, levando-se em conta o leiaute do ambiente.

Várias estratégias de seleção utilizando conceitos de lógica nebulosa foram testadas. Dentre estas estratégias a que se destaca é a máxima similaridade na estrutura generalizada de Łukasiewickz (única estrutura de múltiplos valores onde a média de diversas similaridades nebulosas ainda é uma similaridade nebulosa), que mostrou maior coerência entre os resultados obtidos com a simulação do ambiente completo em CFD (dinâmica de fluidos computacional).

Utilizando a abordagem proposta é possível o desenvolvimento de um sistema computacional simples para a análise da ventilação, sem que sejam necessários conhecimentos aprofundados das formulações da dinâmica dos fluidos ou mesmo dos parâmetros de simulação.

Motezuki e Cheng (2009b) implementaram uma ferramenta computacional com base na Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) que procura suprir não só a adaptação do sistema quanto aos requisitos da indústria da construção civil como também o

desenvolvimento de massa crítica nesta área do conhecimento. Como forma de aproximar o uso dos simuladores computacionais das necessidades de engenheiros e arquitetos, procurou-se utilizar um índice de ventilação setorizado para apresentar os resultados computacionais de modo a facilitar a interpretação do fenômeno sem que se perca a relação entre o fenômeno físico da ventilação e o índice.

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

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

Queiroz *et al* (2009) analisaram o comportamento da ventilação na morfologia urbana recorrente nos conjuntos habitacionais unifamiliares usando o software Phoenics 3.5[®], o potencial de ventilação de suas casas e assim localizar as habitações prejudicadas.

Os resultados das simulações mostraram que cada solução de desenho urbano apresenta especificidades, e que as estratégias para implantação da malha urbana devem considerar a incidência de ventos dominantes locais. Os frontais e posteriores adotados nos conjuntos habitacionais possibilitam o fluxo de ar na malha urbana, porém há zonas de estagnação de pressão. Os recuos laterais (1,5m) se mostraram pequenos e insuficientes para o desenvolvimento do regime de ventos. Em muitos casos onde a fachada principal estava paralela a direção dos ventos, a inserção de aberturas nas laterais das casas não contribuiu para os índices de ventilação.

As simulações do vento incidindo ortogonalmente às quadras do conjunto e perpendicularmente às aberturas apresentaram índices elevados de ventilação. Porém,

as casas que possuem fachada paralela à direção do fluxo (fluxo na direção da rua) apresentaram os piores índices de taxa de renovação de ar.

Nos casos com incidência oblíqua em relação à malha urbana, as simulações mostraram diferenças de pressão inferiores aos encontrados em incidências ortogonais. Estes casos apresentaram resultados mais uniformes e valores médios superiores aos casos ortogonais. Observou-se, também, que com incidência oblíqua, as piores taxas de renovação do vento estão nas casas adjacentes às esquinas opostas a direção do vento.

Araújo e Cunha (2010) propuseram um método que relaciona a ferramenta à etapa em desenvolvimento e apresenta aprovável repercussão de sua aplicação no desempenho final da edificação, e esta associação evita que o projetista perca tempo com ferramentas demasiadamente complexas para resolver questões simples ou que tome decisões cruciais com base em critérios superficiais. Dentre as ferramentas analisadas concluíram que o uso de programas de simulação computacional durante o desenvolvimento do projeto permite a utilização adequada das estratégias arquitetônicas, bem como avaliar o impacto das decisões tomadas no desempenho da ventilação natural. Todavia, os custos de aquisição, o aprendizado, a operação, a seleção das variáveis baseada nos conceitos de mecânica dos fluidos e o tempo de simulação inviabilizam a difusão do CFD nos escritórios de arquitetura, principalmente os de pequeno e médio porte. Contudo, acredita-se que a contínua melhoria na interface, o desenvolvimento de novas plataformas e a redução dos custos de aquisição favorecerão a disseminação da simulação como ferramenta de análise da ventilação aplicável à prática projetual. A vantagem do CFD, frente às demais ferramentas, é a determinação dos campos de velocidade, de pressão, de temperatura e de concentração de poluentes em todo o ambiente. A possibilidade de testar modelos simplificados referentes aos esboços desenvolvidos em programas de simulação computacional permite quantificar o benefício das alternativas possíveis, dando argumentos consistentes ao projetista para investir nos elementos com maior repercussão no resultado final.

Cunha (2010) apresentou o levantamento dos métodos de estimativa do C_p (Coeficiente de Pressão) sobre as aberturas e compara os resultados de um destes métodos com os dados resultantes de simulações em CFD, visando uma validação mútua das abordagens. Afirma ainda que a medição da pressão sobre a envoltória é complexa, pois depende da velocidade e direção do vento, da dimensão e forma da edificação e da posição e tamanho das aberturas, existindo diferentes métodos para estimar o C_p ao redor da edificação e o projetista interessado em quantificar o desempenho da ventilação deve conhecer e aplicar algum destes métodos. Analisando isoladamente cada tipo de abertura, por meio do software CFX[®], percebeu-se uma amplitude significativa do gradiente de pressão, com maior ênfase na abertura grande, pois o gradiente de pressão apresentou maior valor para a incidência oblíqua e nas zonas a sota-vento. Quanto aos valores, na média, o coeficiente de pressão foi próximo a 1 quando o vento incide perpendicularmente à abertura de entrada e permanece constante nos primeiros 30°. A partir de então, o coeficiente decresceu rapidamente, sendo nulo para a incidência em torno dos 60°, sendo que os valores mínimos são encontrados quando o escoamento incide paralelamente à fachada que contém a abertura e volta a crescer, mesmo que ainda continue com valores negativos, à medida que o ângulo de incidência se aproxima dos 180°.

Stavrakakis *et al* (2010) avaliaram a ventilação natural de uma edificação localizada em área rural (figura 2.62) utilizando o software Fluent[®] (CFD), no qual foram abordados o fenômeno físico e os efeitos de fatores de arquitetura em conforto térmico, como tamanho das aberturas e posição da edificação. Os resultados numéricos foram utilizados para calcular índices de conforto térmico referindo-se tanto ao equilíbrio de calor da pele como as correntes de ar, e, tais índices foram comparados com dados da literatura, obtendo-se a compatibilidade entre os resultados. Concluiu-se que para as condições climáticas específicas estudadas (ou seja, o local específico ideal e os dados meteorológicos recolhidos), bem como para a construção de geometria específica, um dos melhores projetos é o de direção do fluxo vertical e metade da entrada de ventilação aberta.

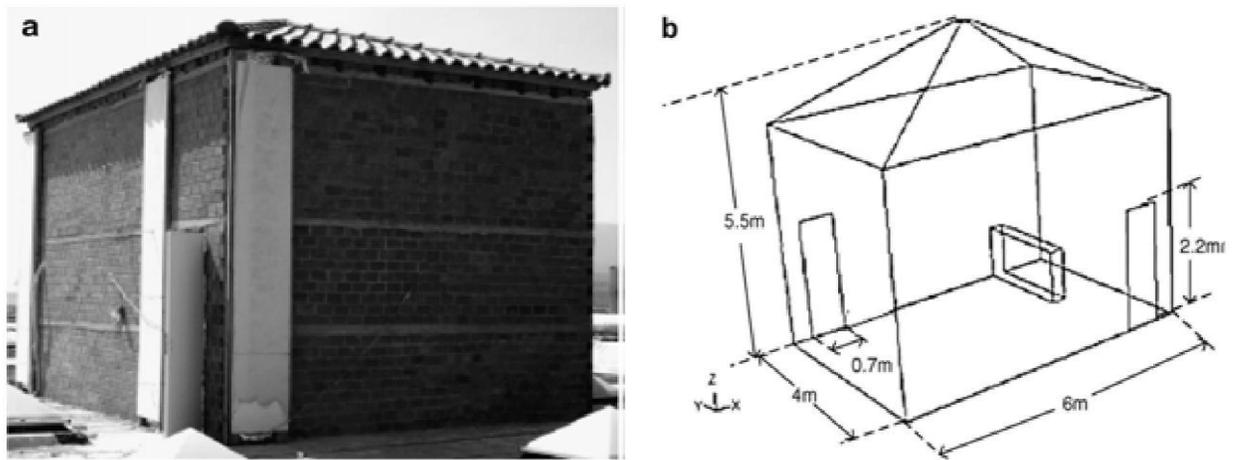


Figura 2.62: Edificação rural utilizada como referência (a) e detalhes geométricos (b)

Fonte: STAVRAKAKIS *et al*, 2010

Cheng *et al* (2011) realizaram uma investigação sistemática do fluxo de vento sobre um edifício em forma “H” e determinaram seus efeitos sobre a dispersão de poluentes para fora das baías, utilizando simulações no software CFX[®] (CFD), considerando essa edificação inserida em uma cidade metropolitana como Hong Kong (figura 2.63). Os resultados, variando as dimensões e posições, revelaram que o fluxo de vento externo em torno de um edifício não é significativamente alterado pela presença de uma baía reentrante, seja a barlavento ou a sota-vento, cujo fluxo ocorre em velocidade lenta. O padrão de fluxo dentro de uma baía no lado de sotavento do edifício é o contrário da de barlavento, na qual a vazão e o tempo de retenção são maiores. Em geral, a troca de ar e dispersão de poluentes são inferiores em baías mais altas e profundas, onde o vento induzido naturalmente pode não ser capaz de eliminar efluentes gasosos prejudiciais ou o calor das baías, sugerindo-se implantar uma baía rasa reentrante com profundidade menor do que 1/8 da largura do edifício.

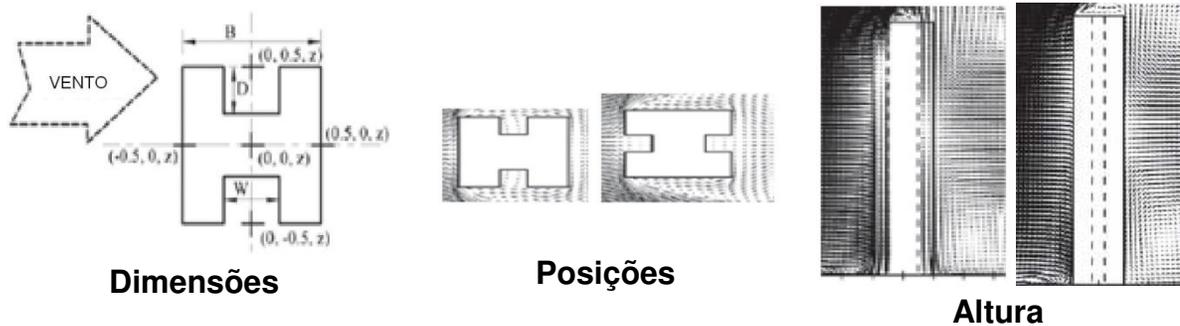


Figura 2.63: Configurações analisadas no software CFX[®]

Fonte: Adaptado de CHENG *et al*, 2011

Coelho *et al* (2011) investigaram, por meio de simulação CFD, a variação no tempo da distribuição de temperatura em um auditório durante os momentos nos quais o condicionador de ar está ligado e verificaram a diferença entre valores de temperatura simulados e obtidos experimentalmente. Um modelo CFD desse auditório foi criado e simulado utilizando o software CFX[®] 11, no qual foram utilizadas condições de contorno obtidas experimentalmente. Os resultados obtidos na simulação concordaram, de modo geral, com dados de temperatura obtidos experimentalmente. No entanto, há ainda espaço para que o modelo CFD utilizado e os resultados obtidos sejam melhorados. Modelos mais completos, contendo a modelagem de carga térmica geradas por pessoas, devem ser incluídos para que as simulações possam refletir com maior fidelidade, situações de ocupação de ambientes condicionados. Apesar das simplificações utilizadas no modelo, os resultados encontrados demonstram que a utilização de simulações CFD para avaliação de ambientes condicionados é promissora.

Luo e Li (2011) estudaram o impacto do vento em uma área urbana rodeada por montanhas, como Hong Kong, Los Angeles, Phoenix e Tóquio, utilizando o software Fluent[®] (baseado em CFD), cujo escoamento é inclinado (figura 2.64), dando-se atenção, também, ao mecanismo de ventilação em “canyons” de proporções diferentes. Verificou-se que o fluxo inclinado pode ser benéfico para ventilar a área urbana, bem como amenizar a ilha de calor urbana, pois quando as edificações apresentarem altura inferior a 60m, o vento catabático (vento que transporta ar de alta densidade de uma

elevação descendo a encosta devido à ação da gravidade) domina a ventilação, e, em edifícios com altura máxima de 10m, esse vento pode facilmente penetrar e descarregar no “canyon”. No entanto, para edifícios de grande altura, como 100 m, o escoamento sobre suas paredes torna-se tão importante quanto o fluxo catabático. Para áreas urbanas em desenvolvimento, o vento catabático é uma boa opção para aliviar as altas temperaturas e dispersar os poluentes, especialmente no nível de pedestres.

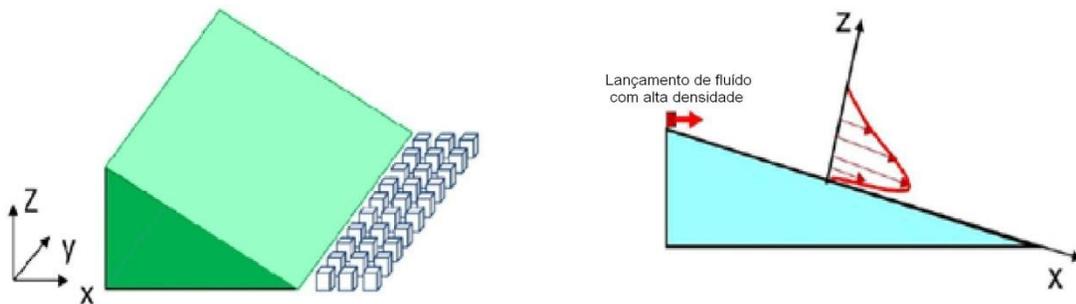


Figura 2.64: Representação da área urbana em região montanhosa (esquerda) e direção do vento (direita)

Fonte: Adaptado de LUO; LI, 2011

Oliveira, Labaki e Vatauvuk (2011) fizeram a proposta de uma metodologia, por meio do uso de simulação computacional, para o estudo da ventilação natural relacionando a velocidade de um determinado fluxo de ar em uma área urbana, com a velocidade do vento que chega à área externa as edificações. Partindo de um banco de dados existente sobre loteamentos autoconstruídos em Campinas/SP, utilizaram a simulação computacional como ferramenta pelo uso de CFD (Computational Fluid Dynamics), utilizando o software Phoenics 3.6[®]. A metodologia proposta demonstrou as dificuldades encontradas para definir os padrões de simulação, para uma representação simplificada que repercutisse os principais pontos de análise do bairro estudado. Analisou-se a aplicação de modelos padrão, as condições de contorno usadas para as fronteiras superiores, o tipo de objeto de domínio, a quantidade de células utilizadas, o padrão de convergência para um processador Pentium dual core[®]. A dificuldade da linguagem computacional para arquitetos pode complicar o uso da ferramenta, e, as simulações computacionais foram amplamente estudadas para que o resultado final fosse alcançado com o máximo de exatidão possível. É importante relatar que o

Phoenix[®] é um software complexo, e que a inserção dos dados foi realizada com a maior clareza possível.

Wu *et al* (2011) compararam as estratégias de ventilação propostas pelo arquiteto italiano Renzo Piano no projeto do Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou, localizado em Noumea, Caledônia (figura 2.65) com simulações realizadas no software ASI-ACE+[®] (CFD). Os ensaios mostraram que o ar externo passa pelo interior do edifício através das grelhas superiores e inferiores, e, em resposta à superfície frontal inadequada para dirigir o fluxo de ar para dentro da edificação, o projeto deve ser melhorado para reforçar a eficácia da ventilação natural no nível de vento, promovendo um crescimento significativo na taxa de fluxo volumétrico de 19,24 para 39,34m³/s, aumentando a área de aeração em conjunto com obstáculos minimizados ao longo do caminho de fluxo. Para atender a necessidade de equilíbrio de pressão a partir do conceito original, as simulações indicam efetiva realização de equilíbrio de pressão quase completo entre o ar exterior e o projeto aprimorado.

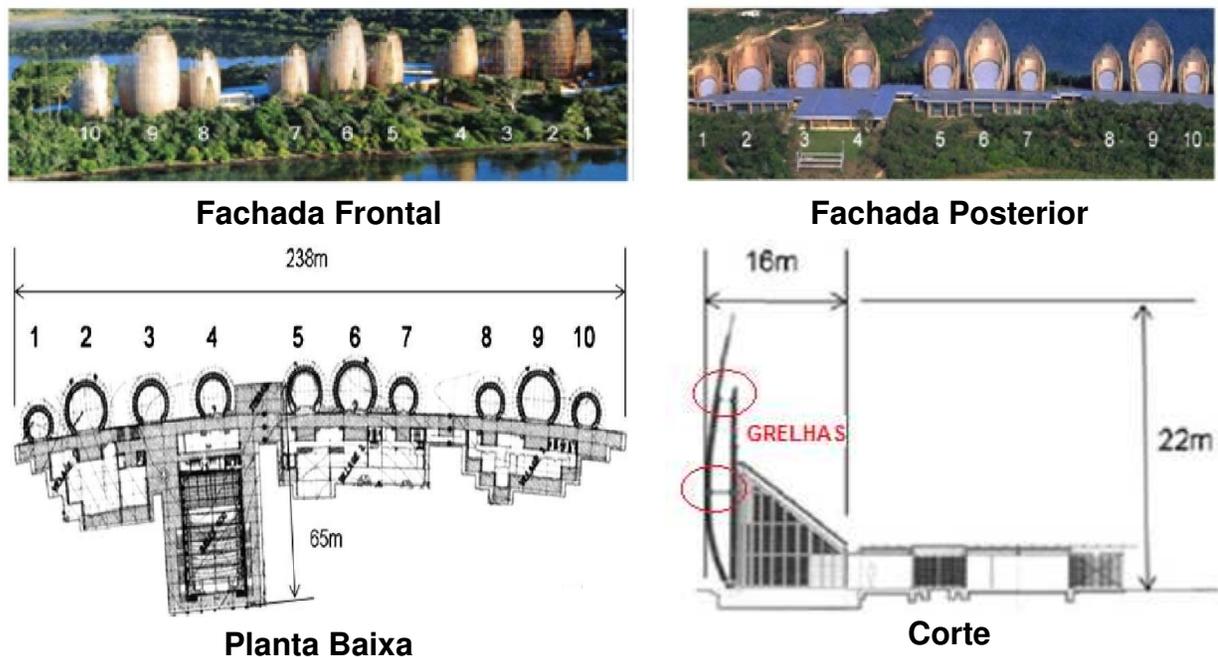


Figura 2.65: Centro Cultural Jean-Marie Tjibaou

Fonte: WU *et al*, 2011

2.5. Torre de Vento: Ensaio em Túnel de Vento e Simulação em Software CFX®

Elmualim (2004) pesquisou o comportamento de torre de vento por meio de ensaio em túnel de vento e no software CFX® para comparar os resultados posteriormente. Foi utilizado o túnel de vento do laboratório da Associação de Pesquisa e Informação de Serviços de Construção (BSRIA) de Crowthorne, Reino Unido, onde foi montado um captador de vento, com seção quadrada de 0,5m de lado e 1,5m de altura, conectado a uma sala teste com 15,25m³ de volume, sendo que apenas o captador foi inserido no interior do túnel (figura 2.66). A torre teve seu interior dividido em quatro partes e testada com velocidades de vento de 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 e 6m/s, variando sua posição com ângulos de 0°, 15°, 30° e 45° (figura 2.67).

Para a determinação dos coeficientes de pressão foram fixados sensores nas aberturas de entrada e saída de ar da torre, das quais se registraram dez leituras, sendo calculada a média destas para melhor análise. Além disso, realizou-se um teste de fumaça, verificando o trajeto feito pelo vento.

A verificação do comportamento da torre testado no software CFX® foi feita com as mesmas tipologias e condições do experimento em túnel de vento. Após a determinação dos coeficientes de pressão fez-se a comparação entre os resultados dos dois experimentos (tabela 2.10).

A partir dos dois resultados concluiu-se que o desempenho do captador depende da direção e velocidade do vento em relação às suas fachadas, sendo que em todos os casos examinados, os testes de túnel de vento mostraram o aumento da taxa de ventilação com a velocidade do vento elevada e pouco diminui com o aumento do ângulo de direção do vento no intervalo entre 0° e 45°. Os resultados obtidos com CFX® correlacionam relativamente bem com os resultados experimentais em baixas velocidades do vento e com a incidência de vento em ângulos de 0° e 15°, mas oferece resultados mais elevados para ângulos do vento de 30° e 45°, devido à dificuldade de medir com precisão o fluxo de ar e complicações na montagem do modelo. A comparação mostra que o teste em túnel de vento é indispensável para medir a pressão

e velocidades de vento utilizando modelos, e, a modelagem CFX[®] deve ser cuidadosamente analisada pela ausência de dados experimentais.

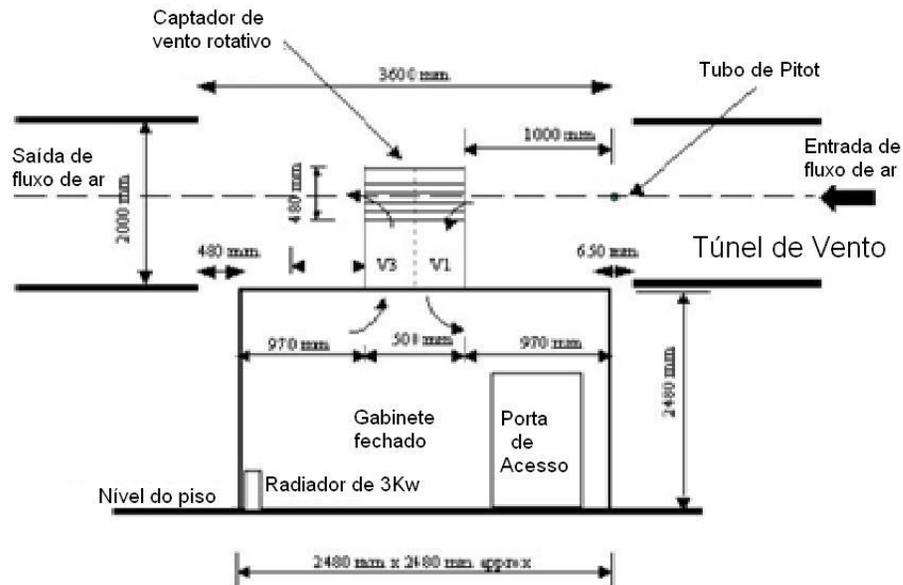


Figura 2.66: Esquema de montagem para simulação em túnel de vento

Fonte: Adaptado de ELMUALIM, 2004

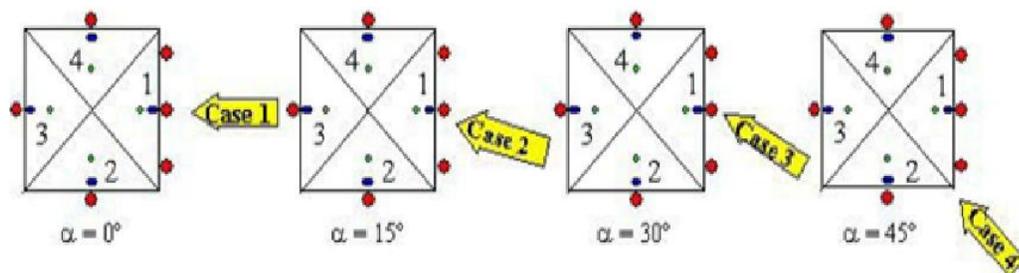


Figura 2.67: Esquema dos quadrantes e ângulos testados. Os pontos em verde e vermelho indicam a posição dos sensores

Fonte: ELMUALIM, 2004

Tabela 2.10: Comparação dos coeficientes de pressão dos experimentos em túnel de vento e software CFX[®]

Quadrante	Vento a 0°		Vento a 15°		Vento a 30°		Vento a 45°	
	Túnel de vento	CFX [®]						
Face 1	0,83	0,84	0,83	0,60	0,70	0,38	0,51	0,30
Face 2	-0,34	-0,55	-0,22	-0,53	-0,20	-0,65	0,11	0,20
Face 3	-0,10	-0,44	-0,10	-0,48	-0,10	-0,46	-0,20	-0,58
Face 4	-0,33	-0,55	-0,30	-0,34	-0,23	-0,10	-0,20	-0,58

Fonte: ELMUALIM, 2004

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos da pesquisa, a abordagem metodológica adotada é composta pelas seguintes etapas: definição das geometrias das torres, avaliação segundo o ângulo de incidência, definição e construção das maquetes, ensaios no túnel de vento e simulações no software CFX[®] (velocidade e pressão).

3.1. Definição das geometrias das torres

Para essa pesquisa foram adotadas quatro tipos de torres com as seguintes geometrias: unidirecional (uma abertura), tetradirecional (quatro aberturas), octodirecional (oito aberturas) e dodecadirecional (doze aberturas).

Observa-se que as três primeiras torres são as mais frequentes na cultura oriental, enquanto que a de doze aberturas foi projetada para reforçar a hipótese.

3.2. Avaliação segundo o ângulo de incidência

As maquetes foram rotacionadas no interior do túnel de vento, mais precisamente a cada 15°, para analisar a incidência do vento em várias posições da torre e da edificação, cujo ângulo foi selecionado por permitir que todas as aberturas das diferentes torres se posicionem perpendicularmente ao vento.

3.3. Ensaios no túnel de vento

3.3.1. Túnel de Vento

Para a realização dos ensaios foi utilizado o túnel de vento de camada limite atmosférica do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – LACAF/Unicamp (figura 3.1).

As dimensões da seção de ensaio desse túnel de vento são de 0,9m de largura por 0,8m de altura, totalizando uma área da seção transversal de 0,72m². A velocidade máxima, com a câmara de ensaios livre é de 20m/s. A maquete de ensaio deve obstruir até 7% da área transversal, ou seja, a área frontal da maquete, perpendicular ao vento, deve ter no máximo 0,05m². Na direção horizontal ao longo do túnel, não há restrições com relação às dimensões.

Dentro do túnel, a turbulência é gerada com uma superfície rugosa e gradiente de pressão nulo, devido à necessidade de gerar uma camada limite turbulenta (MATSUMOTO; LABAKI, 2012). O crescimento da camada limite deve ser acelerado artificialmente com dispositivos posicionados dentro do túnel (figura 3.2).



Figura 3.1: Túnel de vento do LACAF/Unicamp



Figura 3.2: Gerador de turbulência no túnel de vento do LACAF/Unicamp

Utilizando os ensaios no túnel de vento de camada limite atmosférica é possível reproduzir, na seção de ensaio, condições semelhantes às que ocorrem no ambiente atmosférico. Além disso, os seus resultados ressaltam como as mudanças arquitetônicas influenciam na obtenção de uma ventilação natural mais eficiente.

3.3.2. Definição das maquetes

As maquetes unidirecional e tetradirecional foram definidas baseando-se no modelo utilizado por Karakatsanis, Bahadori e Vickery (1986) com algumas modificações na edificação acoplada à torre, como a altura e dimensões das aberturas, as quais foram projetadas de acordo com o Código Sanitário (1978) (figuras 3.3 e 3.4).

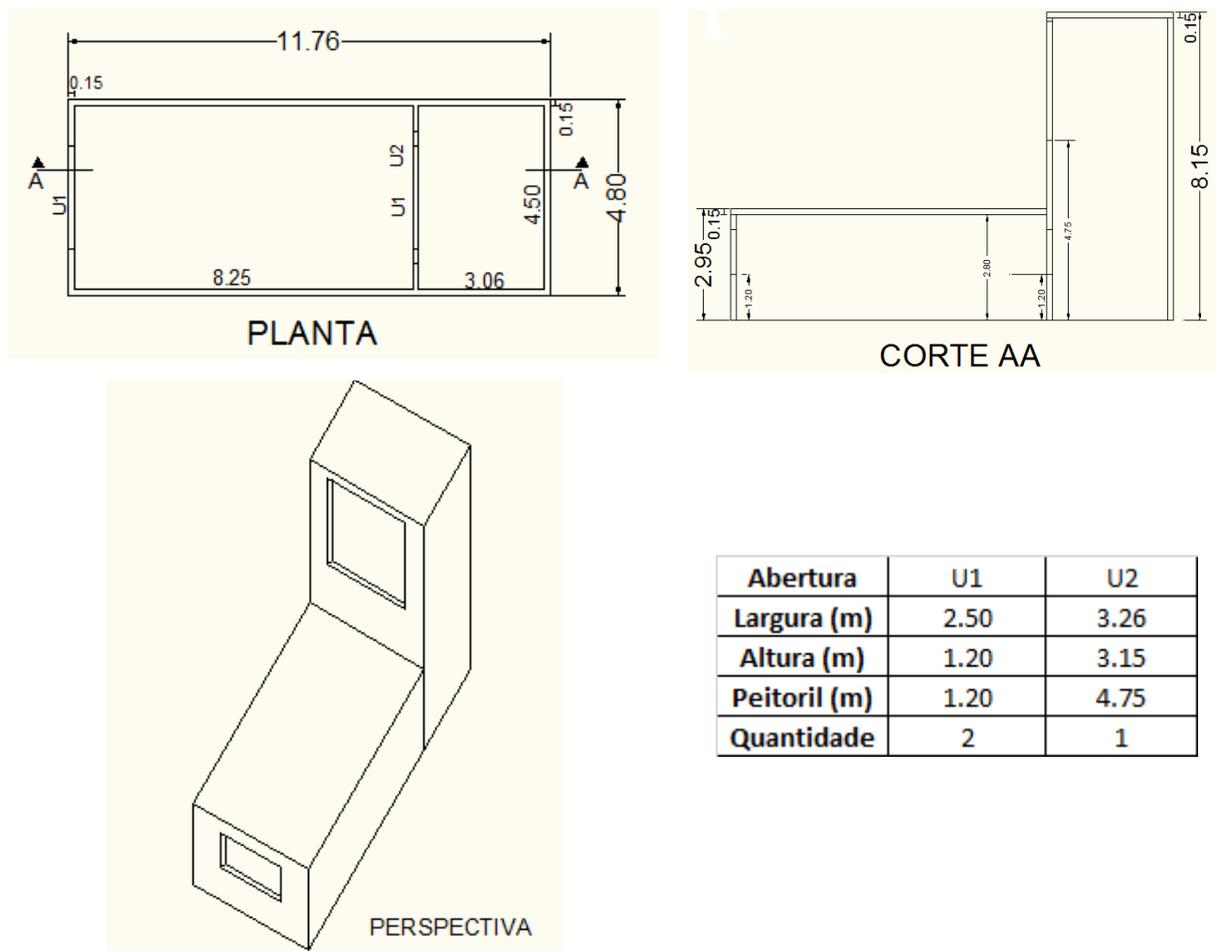


Figura 3.3: Esquema da edificação com torre unidirecional

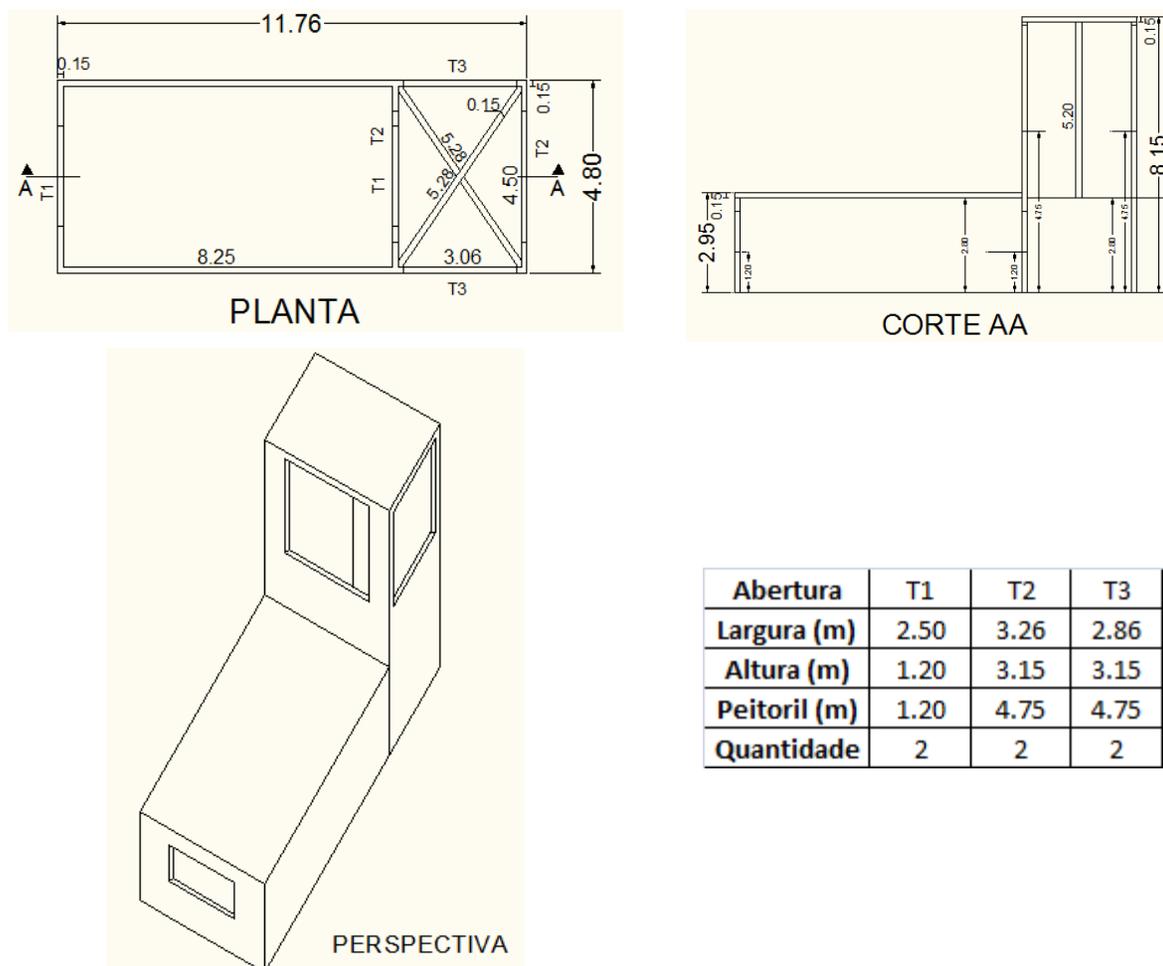
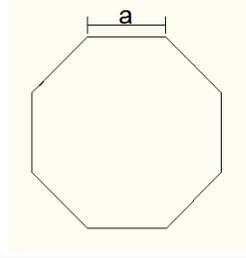
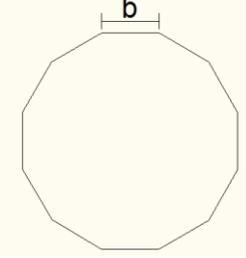
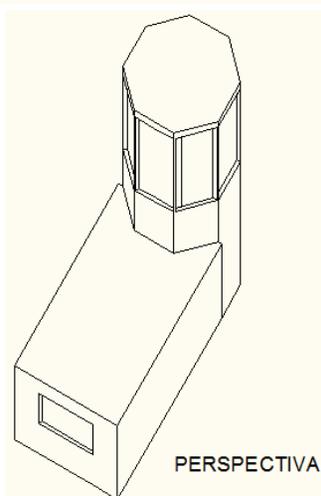
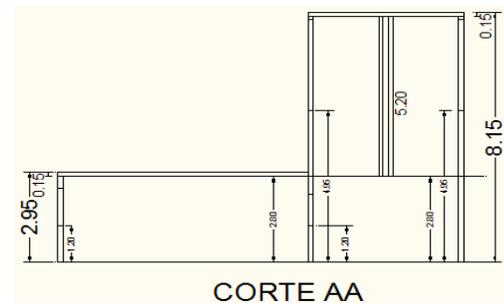
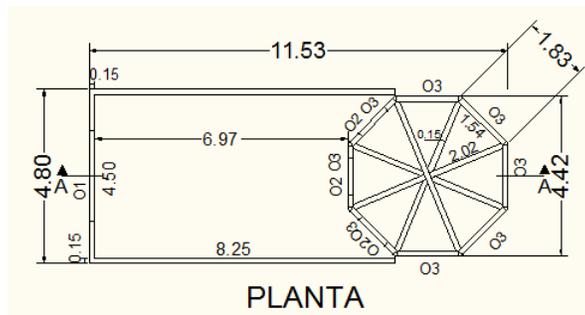


Figura 3.4: Esquema da edificação com torre tetradirecional

As torres octodirecional e dodecadirecional (figuras 3.5 e 3.6) foram projetadas com a mesma área da seção transversal da maquete de quatro aberturas e por meio das relações de áreas de figuras planas, definindo-se assim, a dimensão de seus lados (tabela 3.1), e, a soma das áreas das aberturas superiores e inferiores é igual à da maquete tetradirecional.

Tabela 3.1: Dimensões projetuais das torres de oito e doze lados

Torre	Esquema	Dimensão
Octogonal		$\text{Área}_o = 4.82843 \cdot a^2$ a= dimensão do lado do octógono
Dodecagonal		$\text{Área}_d = 11.1962 \cdot b^2$ b= dimensão do lado do dodecágono



Abertura	O1	O2	O3
Largura (m)	2.50	1.00	1.70
Altura (m)	1.20	1.00	2.95
Peitoril (m)	1.20	1.20	4.95
Quantidade	1	3	8

Figura 3.5: Esquema da edificação com torre octodirecional

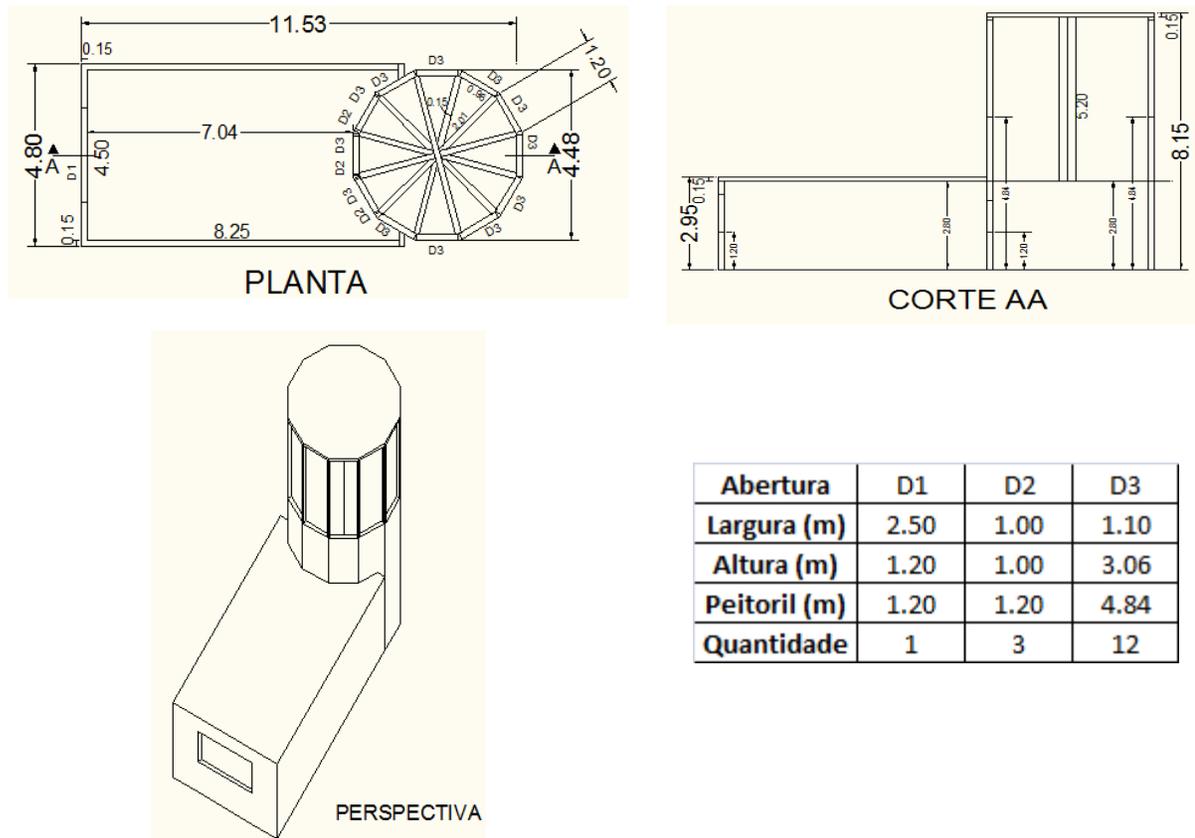


Figura 3.6: Esquema da edificação com torre dodecadirecional

3.3.3. Construção das maquetes

As maquetes das torres bem como da edificação foram construídas na escala 1:50 e com base nas dimensões exigidas pela seção de ensaio do túnel, cujas dimensões em escala real e modelo reduzido se encontram na tabela 3.2.

Após definida a escala, planificaram-se todas as partes das maquetes no software AutoCAD®, as quais foram construídas utilizando-se como material o acrílico, facilitando a visualização durante os ensaios. As peças em acrílico foram cortadas a laser no Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção, da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (LAPAC/FEC) da Unicamp (figura 3.7).

Tabela 3.2: Dimensões das torres utilizadas nos ensaios

Escala			01:50
		Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)
Torre	Altura	8.15	0.1630
	Largura	3.36	0.0672
	Comprimento	4.80	0.0960
Edificação	Altura	2.95	0.0590
	Largura	4.80	0.0960
	Comprimento	8.40	0.1680
Área da seção de ensaio (m ²)	0.7200		
Área frontal do modelo (m ²)	0.0156		
Obstrução da seção de ensaio (%)	2		



Figura 3.7: Corte das peças de acrílico no LAPAC/Unicamp

Posteriormente, construíram-se as maquetes, com os detalhes necessários: paredes, divisórias cruzadas e teto, conforme a figura 3.8.

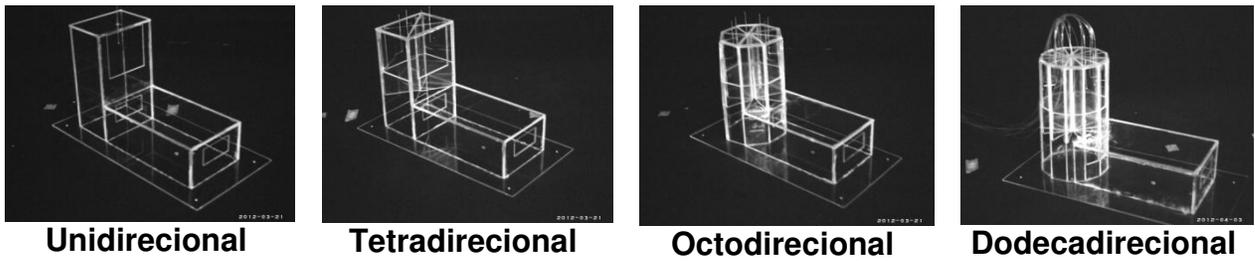


Figura 3.8: Maquetes utilizadas nos ensaios

3.3.4. Ensaios no túnel de vento

a) Ensaios de velocidade

Para medir as velocidades, interna e externa do vento nas maquetes, foram utilizados anemômetros de fio quente da marca Dantec, modelo Multichannel 54N81, cuja faixa de velocidade do sensor de referência para calibração é de 0,2 a 30m/s (figura 3.9).



Ligação dos sensores



Passagem dos sensores sob o túnel de vento

Figura 3.9: Sensores do anemômetro de fio quente

Os ensaios de velocidade foram realizados para as frequências de 145, 410 e 830rpm, as quais representam o número de voltas que o motor e a hélice executam, e estão relacionadas com as velocidades do ar de 2, 5 e 10m/s, respectivamente, dentro do túnel de vento.

A quantidade de sensores de velocidade, seis no total, é insuficiente para atender a todas as aberturas das torres octogonal e dodecagonal. Sendo assim, foram instalados, um sensor (V2) no interior da maquete da edificação, através de furo na parte inferior, quatro sensores (V3, V4, V5 e V6) localizados no centro das aberturas, na direção longitudinal em relação ao vento incidente na edificação, alternando-se as suas posições (tabela 3.3), e um sensor (V1) na parte frontal da maquete, a uma distância equivalente a 0,42m da fachada e a uma altura de 0,16m do solo para medir a velocidade do vento antes de atingir o modelo físico, tendo-se assim o valor do escoamento não perturbado (figuras 3.10 e 3.11).

Buscando-se analisar a orientação e a geometria das torres de vento, realizaram-se várias possibilidades de ensaios de velocidade para cada modelo, posicionando as maquetes variando o ângulo de incidência do vento em relação à abertura da edificação, para analisar o funcionamento desse dispositivo como captador ou extrator (tabela 3.3).

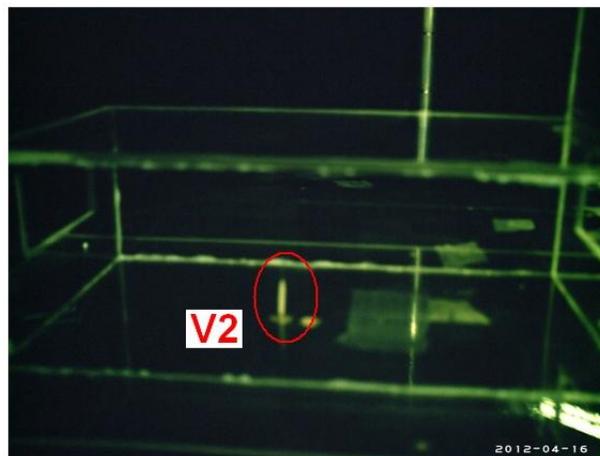
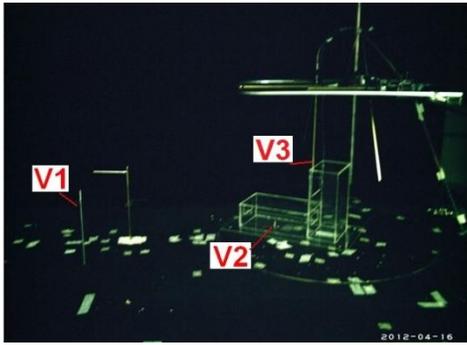


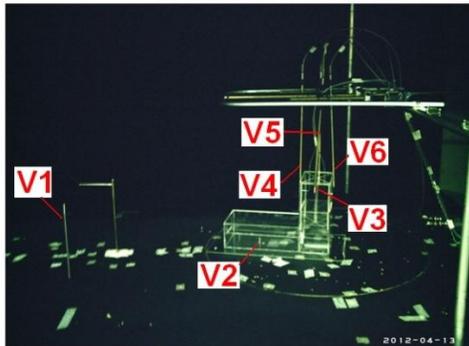
Figura 3.10: Detalhe do sensor de velocidade no interior da maquete da edificação



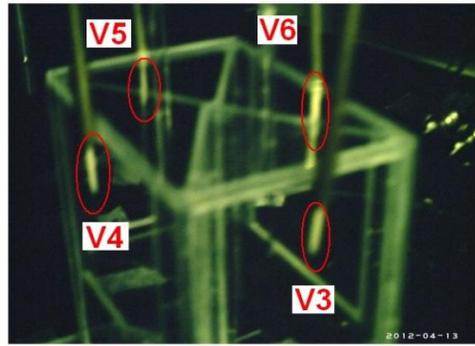
Unidirecional



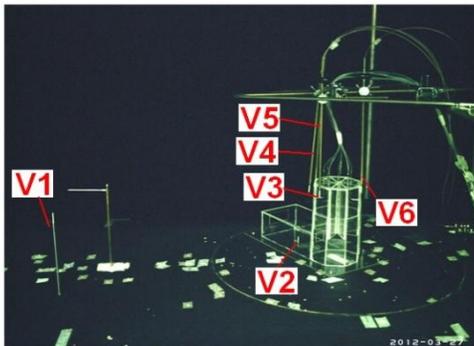
Detalhe na torre



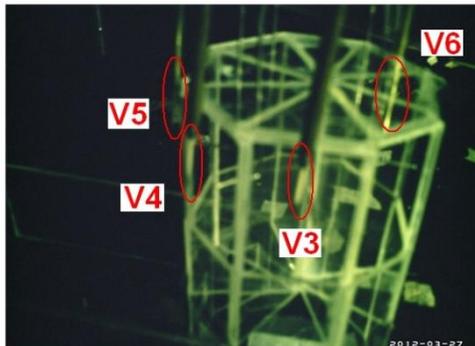
Tetradirecional



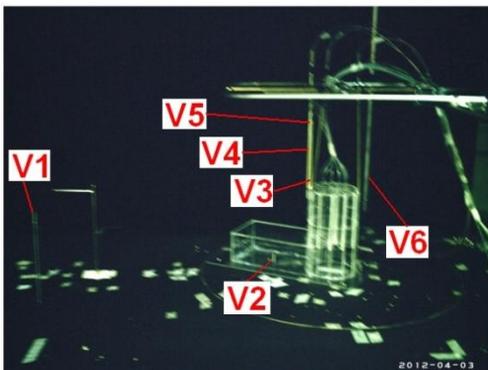
Detalhe na torre



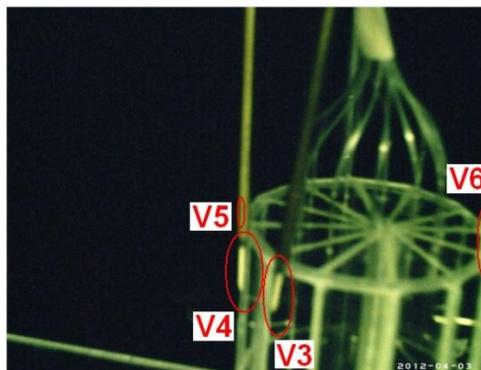
Octodirecional



Detalhe na torre



Dodecadirecional



Detalhe na torre

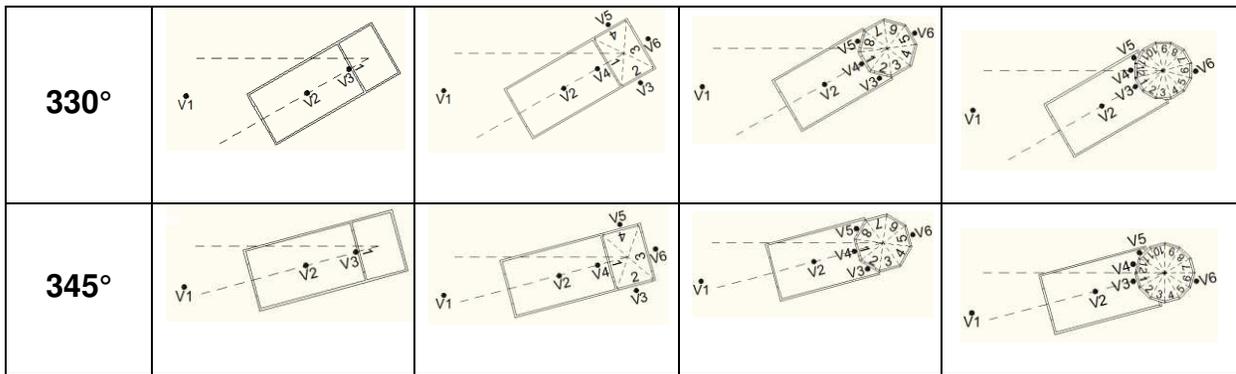
Figura 3.11: Posição dos sensores de velocidade em cada modelo de torre

Tabela 3.3: Posicionamento das maquetes e ângulo de incidência do vento

Ângulo X Torre	Unidirecional	Tetradirecional	Octodirecional	Dodecadirecional
0°				
15°				
30°				
45°				
60°				
75°				
90°				

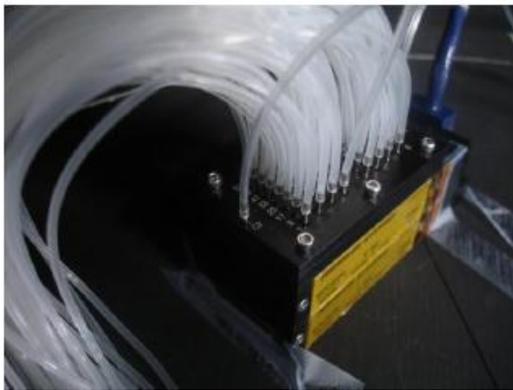
105°				
120°				
135°				
150°				
165°				
180°				
195°				
210°				

225°				
240°				
255°				
270°				
285°				
300°				
315°				

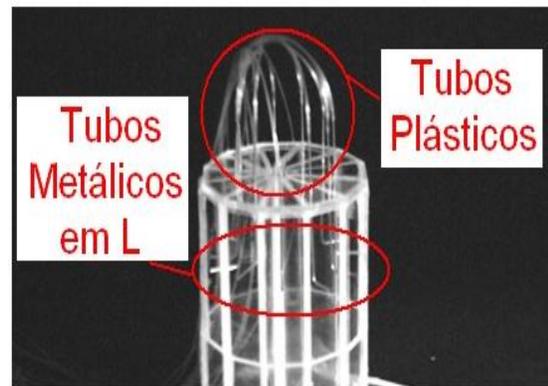


b) Ensaios de pressão

Esses ensaios foram realizados para verificar o comportamento do fluxo de ar na abertura das torres como aspiração ou insuflação, sendo quantificada com o scanner de pressão. No centro das aberturas, nas faces das torres, onde mediram-se as pressões, foram instalados tubos metálicos ligados a finos tubos plásticos com diâmetro interno de 1mm e cada tubo conectado a um tubo numerado do scanner de pressão com capacidade para 64 pontos (figura 3.12).



Scanner de Pressão



Tubos utilizados nas torres

Figura 3.12: Instrumentos utilizados nos ensaios de pressão

O scanner foi conectado a uma placa de aquisição de dados, instalada no computador e, desta maneira, a diferença de pressão em cada ponto ($P_{\text{ponto}} - P_{\text{ref.}}$) nas aberturas das faces foi obtida, e, a partir dessa diferença obteve-se o coeficiente de pressão em cada

abertura solicitada. A frequência interna de aquisição de dados para os dois ensaios foi de 325 Hz, sendo padrão para esse equipamento.

A quantidade de pontos medidos está relacionada com o número de aberturas das torres, isto é, na unidirecional, tetradirecional, octodirecional e dodecadirecional foram medidos um, quatro, oito e doze pontos de pressão respectivamente.

Um ponto de pressão externo foi instalado para a medição da pressão estática no Tubo de Pitot (TP), o qual estava posicionado antes do modelo a ser ensaiado, a uma altura de 16,3cm do piso do túnel (figura 3.13).

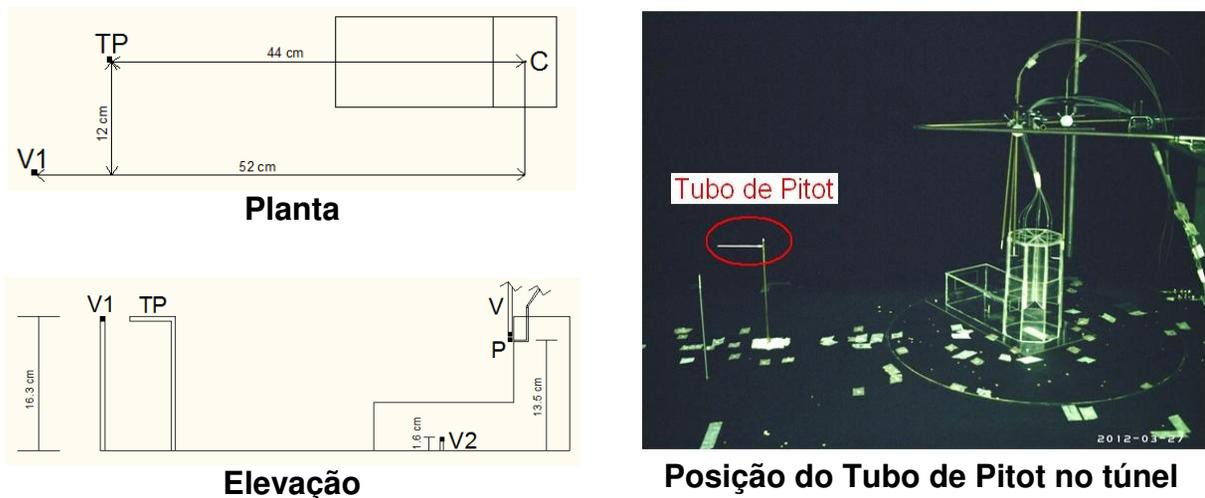


Figura 3.13: Esquema da posição do Tubo de Pitot em relação às torres

Os ensaios de pressão e de velocidade foram realizados simultaneamente com as mesmas frequências e posições, considerando a construção inserida na periferia, ou seja, sem edificações ao seu redor.

3.4. Simulações no software CFX®

As simulações foram realizadas no software CFX 12.1 (ANSYS, 2009), instalado em um computador do LCC/IAU/USP, com processador Intel® Core™ i7 de 3.5Ghz e 6GB de memória RAM.

3.4.1. Descrição da geometria

A primeira etapa da simulação de um modelo CFD é construir a geometria e o domínio computacional no qual o método numérico será aplicado, dando origem ao modelo.

O modelo para CFX[®] pode ser confeccionado no módulo ICEM[®] ou em qualquer aplicativo de CAD[®]. No caso, foram construídas quatro edificações com torres de geometrias retangular (uma e quatro aberturas), octogonal e dodecagonal, todas com a cobertura em lajes. As dimensões desses dispositivos são as mesmas das maquetes ensaiadas no túnel de vento. As aberturas estão presentes nas torres e na parede frontal da edificação. Nesse caso, a confecção do modelo foi realizada no AutoCAD[®], da Autodesk[®], utilizando as ferramentas “extrude”, “subtract” e “union”.

O modelo possui todos os elementos de interesse e suas características reais foram construídas com o máximo de precisão, pois a simplificação do modelo pode gerar dúvida sobre a confiabilidade dos resultados. Os detalhes da geometria do edifício e das torres devem ser considerados, senão muitas interferências deixam de ser respeitadas, alterando os resultados.

Após a finalização da geometria das edificações, elaborou-se o domínio fluido, que é o volume de um espaço determinado por onde o fluxo escoar, e é modelado para simular o escoamento que é externo à edificação, devendo ser estanque, ou seja, sem aberturas, e, grande o suficiente para que o escoamento fosse plenamente desenvolvido sem que em suas fronteiras não houvesse a presença do edifício.

A dimensão do domínio foi definida de acordo com as orientações de Cost (2004) apresentadas em Cóstola (2006), o qual recomenda que a distância da entrada, laterais e topo do domínio seja cinco vezes a altura do maior elemento, enquanto que a distância da saída seja de dez a quinze vezes, para que o fluxo possa assumir novamente o perfil original.

Em relação ao formato do domínio optou-se pela forma retangular que admite uma área menor e viabiliza uma simulação mais rápida. Assim, para dimensionar o domínio adotou-se uma altura H correspondente a altura da torre, isto é, $H=8,15\text{m}$. Dessa maneira, as dimensões foram definidas como $5H=40,75\text{m}$ (a barlavento e laterais), $6H=48,90\text{m}$ (topo) e $15H=122,25\text{m}$ (a sota-vento) a partir das extremidades da geometria (figura 3.14).

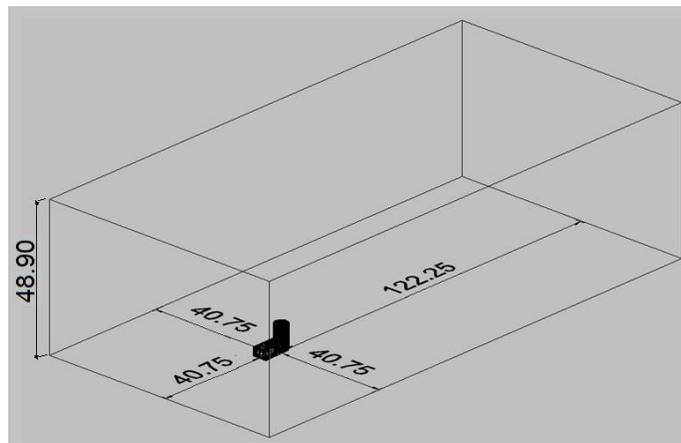


Figura 3.14: Dimensões do domínio (em metros)

Finalizando, a edificação e o domínio foram unidos em um único modelo, eliminando todos os elementos externos às fronteiras do domínio. O formato de exportação mais adequado é o ACIS[®], compatível para ser aberto no ICFM CFX[®], para que o modelo seja exportado como um bloco único, sendo possível, caso necessário, separar as superfícies posteriormente no ICFM[®].

Os quatro modelos foram ensaiados nas posições de 0° , 90° e 180° por serem as mais adotadas na implantação de edificações, e, também na de 270° para verificar a existência de simetria.

3.4.2. Definição das *Parts*

Antes da geração da malha, agruparam-se as superfícies que receberam tratamento semelhante no pré-processamento e tais grupos recebem o nome de *Parts*, que de

acordo com as condições de contorno são: parede (“wall”); entrada (“inlet”); saída (“outlet”) e abertura (“opening”). Parede é uma condição de contorno que se refere a uma fronteira sólida, não permitindo a entrada ou a saída de fluido do domínio. Os termos entrada (“inlet”), saída (“outlet”) ou abertura (“opening”) são condições de contorno referentes às fronteiras pelas quais o fluido entra ou sai do domínio.

Para facilitar a medição das grandezas aerodinâmicas como pressão, nas diferentes faces, as *parts* no edifício e torre foram selecionadas de acordo com a nomenclatura mostrada na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Definição das *Parts* para os modelos ensaiados

<i>Part</i>	Superfície correspondente
Inlet	Entrada do vento no domínio
Outlet	Saída do vento no domínio
Lateral Dom 1	Parede lateral esquerda do domínio
Lateral Dom 2	Parede lateral direita do domínio
Chão Dom	Piso do domínio
Teto Dom	Teto do domínio
Barlavento Ed	Entrada do vento na edificação
Barlavento T	Entrada do vento na torre
Lateral Ed 1	Parede lateral esquerda da edificação
Lateral Ed 2	Parede lateral direita da edificação
Lateral T 1	Parede lateral esquerda da torre
Lateral T 2	Parede lateral direita da torre
Sotavento T	Saída do vento na torre
Teto Ed	Teto da edificação
Teto T	Teto da torre
Divisórias	Paredes divisórias das torres

3.4.3. Determinação da malha

A malha é a discretização do espaço fluido dentro do domínio, definindo os pontos e volumes para os quais as equações Navier-Stokes são resolvidas, e é gerada automaticamente pelo programa, utilizando um método iterativo, após a determinação

dos parâmetros máximos e mínimos dos elementos. Esses elementos são formados por tetraedros, pirâmides, prismas e hexaedros, distribuídos de forma regular, sendo que o número total de elementos determina a capacidade computacional necessária para rodar a simulação e o tempo utilizado em cada iteração. A malha foi automaticamente adequada à forma, refinando-se nos detalhes, os quais determinam o sucesso da simulação, cujos parâmetros utilizados foram variando de acordo com o modelo e a posição ensaiados.

Em seguida aplicaram-se os métodos de geração de malha, definindo o número de iterações, ou seja, o número de tentativas para gerá-la, e a qualidade mínima que essa malha deve apresentar, sendo determinadas cinco iterações com qualidade mínima de 0,4.

A malha foi refinada nas áreas com elevados gradientes, como as próximas a arestas vivas e outros pontos de descolamento da camada limite, como nas aberturas das torres e toda a área interna avaliada (figura 3.15).

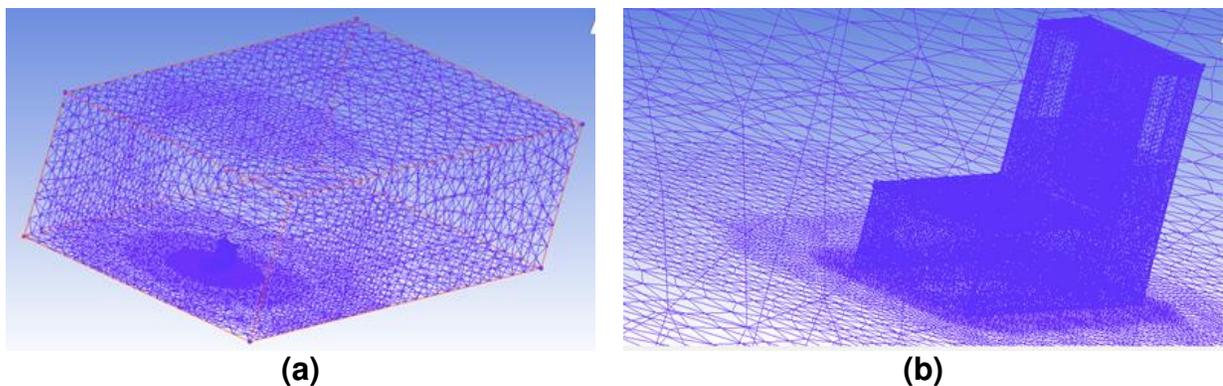


Figura 3.15: Malha no domínio (a) e na edificação com torre (b)

Um teste de refinamento da malha foi realizado para comparar os resultados, sendo que a malha construída não causou nenhuma alteração significativa nos resultados encontrados, e, posteriormente esse arquivo foi salvo e exportado para o CFX Pre[®].

3.4.4. CFX Pre[®]: Condições Iniciais e de Contorno

As simulações foram realizadas em regime permanente, uma vez que as condições de contorno se mantêm constantes. Além disso, a relação entre o campo de velocidade e a velocidade de entrada de ar no modelo se manteve constante para velocidades de vento médias e altas.

Em seguida, especificou-se o tipo de domínio como fluido, sendo que para fins de trabalho o ar é considerado como gás ideal e a pressão de referência como a pressão atmosférica local.

Quanto à determinação do regime térmico a ser utilizado considerou-se que simulações de vento em condição de estabilidade neutra normalmente desprezam as variações de temperatura, considerando que as forças mecânicas promovem uma mistura efetiva do ar que se torna isotérmico.

Por fim, definiu-se o modelo de turbulência, o modelo k- ϵ (k-Epsilon), por oferecer a melhor relação custo (tempo de processamento)-benefício (precisão) e as funções turbulentas de superfície se tornaram como *scalable*, para se ajustarem às interações entre o fluido e as superfícies sólidas.

Todos os parâmetros adotados para as condições iniciais estão descritos na tabela 3.5, assim como as condições de contorno.

Tabela 3.5: Parâmetros das simulações inseridos no CFX Pre[®]

Simulation Type (Regime adotado na simulação)	
Option	Steady State (Regime Permanente)
Domain (Características do domínio)	
Location	Fluido
Domain type	Fluid Domain
Fluids List	Air ideal gas
Coord Frame	Coord 0
Reference Pressure	1 [atm]

Buoyancy	Non Buoyant
Domain motion	Stationary
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	25°C
Turbulence Model	K-Epsilon
Wall function	Scalable
Reaction or Combustion Model	None (default)
Thermal Radiation Model	None (default)
Domain Initialisation	Desmarcado (Default)
Entrada (Características e condições de contorno da <i>Part Inlet</i>)	
Boundary type	Inlet (entrada)
Location	Inlet
Flow regime	Subsonic
Mass and Momentum	Normal speed ⁽¹⁾
Turbulence	Medium intensity = 5%
Saída (Características e condições de contorno da <i>Part Outlet</i>)	
Boundary type	Outlet (saída)
Location	Outlet
Flow regime	Subsonic
Mass and Momentum	Average static Pressure
Relative Pressure	0 [Pa]
Pres. Profile Blend	0.05
Pressure avering	Average over whole outlet
Paredes Domínio (Características e condições de contorno da <i>Part Lateral Dom</i>)	
Boundary type	Wall (parede/superfície sólida)
Location	Lateral Dom 1; Lateral Dom 2
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)
Teto Domínio (Características e condições de contorno da <i>Part Teto Dom</i>)	
Boundary type	Wall (parede/superfície sólida)
Location	Teto Dom
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)
Piso Domínio (Características e condições de contorno da <i>Part Chão Dom</i>)	
Boundary type	Wall (parede/superfície sólida)

Location	Chão Dom
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)
Tetos (Características e condições de contorno das <i>Parts</i> Teto Ed e Teto T)	
Boundary type	Wall (parede/superfície sólida)
Location	Teto Ed; Teto T
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum	Free slip wall (sem atrito)
Verticais (Características e condições de contorno das <i>Parts</i> do edifício)	
Boundary type	Wall (parede/superfície sólida)
Location	Barlavento Ed; Barlavento T; Lateral Ed 1; Lateral Ed 2; Lateral T 1; Lateral T 2; Sotavento T; Divisórias
Coord. Frame	Sem clicar (default)
Mass and momentum	No slip wall (com atrito)
Wall Roughness	Smooth Wall (baixa rugosidade/parede lisa)
Solver Control (Parâmetros para a solução matemática do modelo pelo módulo de cálculo)	
Advection Scheme	High resolution
Turbulence Numerics	First Order
Convergence Control	
Min. n° iterações	1
Max. n° iterações	300 ⁽²⁾
Timescale control	Auto TimeScale (default)
Length Scale	Conservative (default)
Maximum Timescale	Desmarcado (default)
Timescale fator	1.0
Convergence Criteria	
Residual Type	RMS ⁽³⁾
Residual Target	10 ⁻⁴
Conservation Target	Desmarcado (default)
Equation Class Setting	Default
Advanced option	
Global Dynamic Model Control	Marcado (default)
Turbulence Control	Desmarcado (default)
Hydro Control	Desmarcado (default)

Body Forces	Desmarcado (default)
Solution Units (Definição das grandezas utilizadas nos cálculos)	
Mass Units	[kg]
Length Units	[m]
Time Units	[s]
Temperature Units	[K]
Angle Units	[rad]
Solid Angle Units	[sr]

(1) Foram simuladas três velocidades para cada posição de cada modelo: 2m/s, 5m/s e 10m/s;

(2) Houve casos em que foram necessárias 500 iterações para verificar convergência (Apêndice C);

(3) O uso do critério de convergência RMS indica que os valores médios dos resíduos não ultrapassem 10^{-4} .

Deu-se o tratamento diferenciado às paredes “reais” (como as do edifício e do piso, que são classificadas como “sem escorregamento”) e às paredes “para fins de simulação” (como os tetos do edifício, que são classificados como “com escorregamento”). Nas paredes classificadas como “com escorregamento” não há camada limite e o fluido não adere ao sólido, o que minimiza os efeitos dessa fronteira na simulação.

No caso das paredes reais, a condição adotada é a de não escorregamento do fluido, e as partículas fluidas aderem à fronteira sólida, onde a velocidade do fluido neste ponto é igual a zero. À medida que é mantida essa condição de “não escorregamento”, afeta no arrasto provocado pela parede e na camada limite que se formará devido a sua presença, sendo necessário definir a sua rugosidade. A rugosidade pode ser definida como lisa (“smooth”) ou rugosa (“rough”).

Na figura 3.16 percebe-se pelo sentido dos vetores a localização da entrada e saída do domínio definidas no CFX Pre[®].

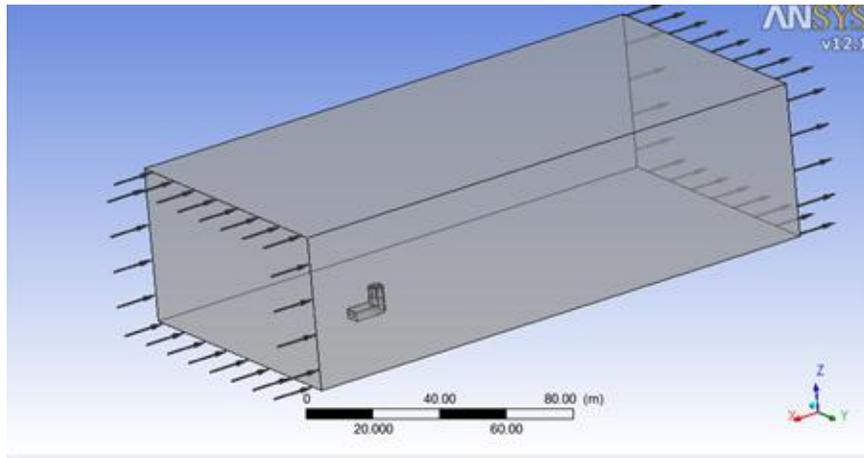


Figura 3.16: Domínio com a definição das condições de entrada e saída do fluido

3.4.5. Controle de solução

O controle de solução determinou os parâmetros para a solução matemática do modelo pelo módulo de cálculo, nos quais foram estabelecidos: o intervalo de tempo, o número máximo de iterações e o critério de convergência a ser adotado. As simulações foram interrompidas quando se atingiu o critério de convergência ou o número máximo de iterações.

A confiabilidade dos resultados gerados na simulação foi observada por meio da convergência, considerando-a de 10^{-4} como meta das simulações.

É importante destacar que inicialmente foram determinadas 300 iterações totais para finalizar o processo de simulação, caso o resultado esperado não atingisse antes o valor mínimo do critério de convergência de 10^{-4} , ou seja, a simulação deve parar quando atinge um desses dois parâmetros primeiro. Entretanto, houve situações em que ela não foi alcançada (Apêndice C), o que não eliminou os resultados gerados.

3.4.6. CFX Solver®

Após as etapas de elaboração do modelo, criação da malha e definição dos parâmetros no CFX Pre®, iniciou-se a simulação propriamente dita no CFX Solver®.

Quando a simulação começou a ser rodada observou-se a evolução do critério de convergência adotado para massa, momento, energia e turbulência (figura 3.17).

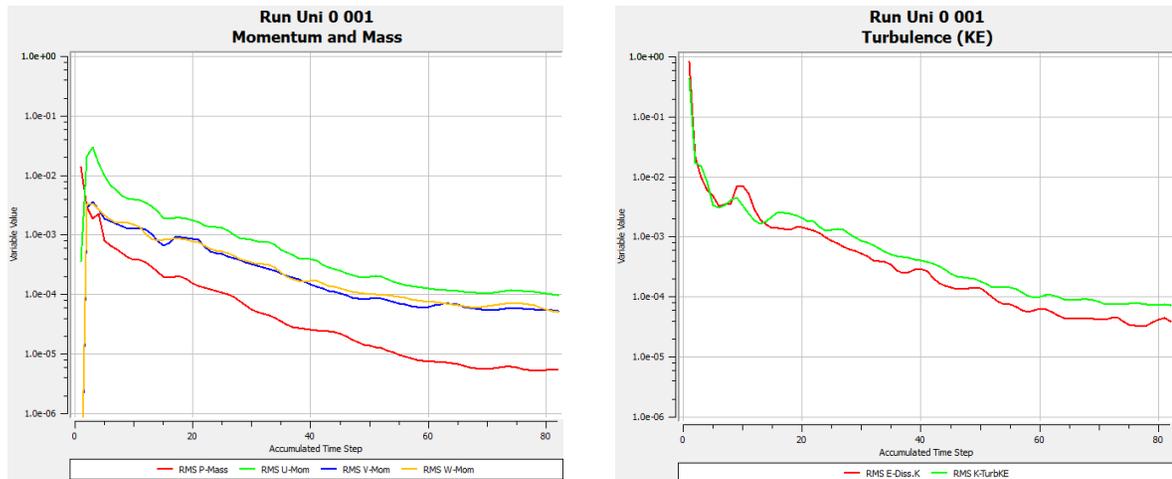


Figura 3.17: Evolução do critério de convergência no software CFX Solver®

O tempo necessário para a finalização dessa etapa depende do tamanho do domínio, da geometria do modelo, do refinamento da malha, da capacidade do computador e todos os parâmetros estimados.

As imagens da evolução do critério de convergência obtidas no software CFX Solver®, para cada torre, são apresentadas no Apêndice C.

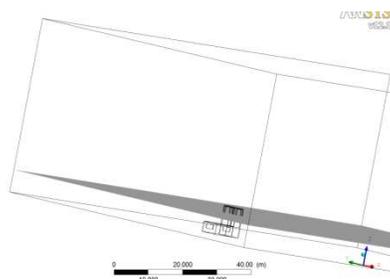
No fim do processamento da simulação é gerado um arquivo de resultados (Apêndice D), que contém o resultado de todas as etapas realizadas e para visualizá-lo em forma de imagens é necessário que ele seja importado pelo CFX Post®, última etapa do processo do CFX®.

3.4.7. CFX Post® (Post-Processing)

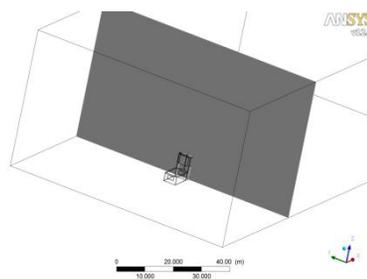
Quando a simulação foi concluída, o software gerou um arquivo de resultados, que permitiu a obtenção de diferentes informações do escoamento, e os resultados puderam ser analisados de forma qualitativa e quantitativa.

O software disponibilizou como resultado uma tabela para cada ponto discreto do escoamento, com um conjunto de valores que representam as grandezas calculadas, como velocidade e pressão, os quais foram apresentados de forma gráfica: imagens dos vetores de direção dos ventos, onde a trajetória de cada ponto é ilustrada pela direção do vetor correspondente, indicando a direção local do escoamento nos diferentes pontos da região; imagens dos contornos das velocidades e pressões, utilizando escalas de cores apropriadas e imagens dos coeficientes de pressão nas aberturas das torres estudadas.

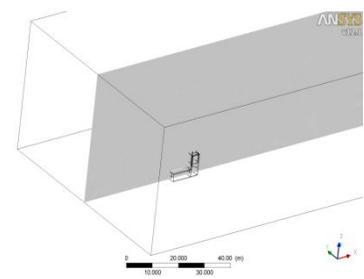
Na simulação foram gerados: dois planos (horizontal e vertical longitudinal) para a torre unidirecional e três planos (horizontal, vertical transversal e longitudinal) para as demais torres (figura 3.18).



Plano Horizontal:
localizado a 6.33m do
piso, passando pelo
centro geométrico das
aberturas superiores da
torre



Plano Vertical
Transversal: passa pelo
eixo simétrico da torre



Plano Vertical
Longitudinal: passa pelo
eixo simétrico da
edificação e da torre

Figura 3.18: Planos de exibição dos resultados

Essas visualizações dos dados permitiram fazer uma análise qualitativa do escoamento de forma rápida e direta. Importantes detalhes do escoamento puderam ser convenientemente visualizados, como as zonas de recirculação devido à separação da camada limite.

Além disso, realizou-se a análise quantitativa com o auxílio de “monitor points”, ou seja, pontos distribuídos estrategicamente nos locais escolhidos (interior da edificação e centro geométrico das aberturas da torre), para a mensuração de grandezas aerodinâmicas, como pressão, velocidades e coeficientes de pressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio no túnel de vento

a) Ensaio de velocidade

Os dados das medições realizadas no túnel de vento encontram-se representados nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

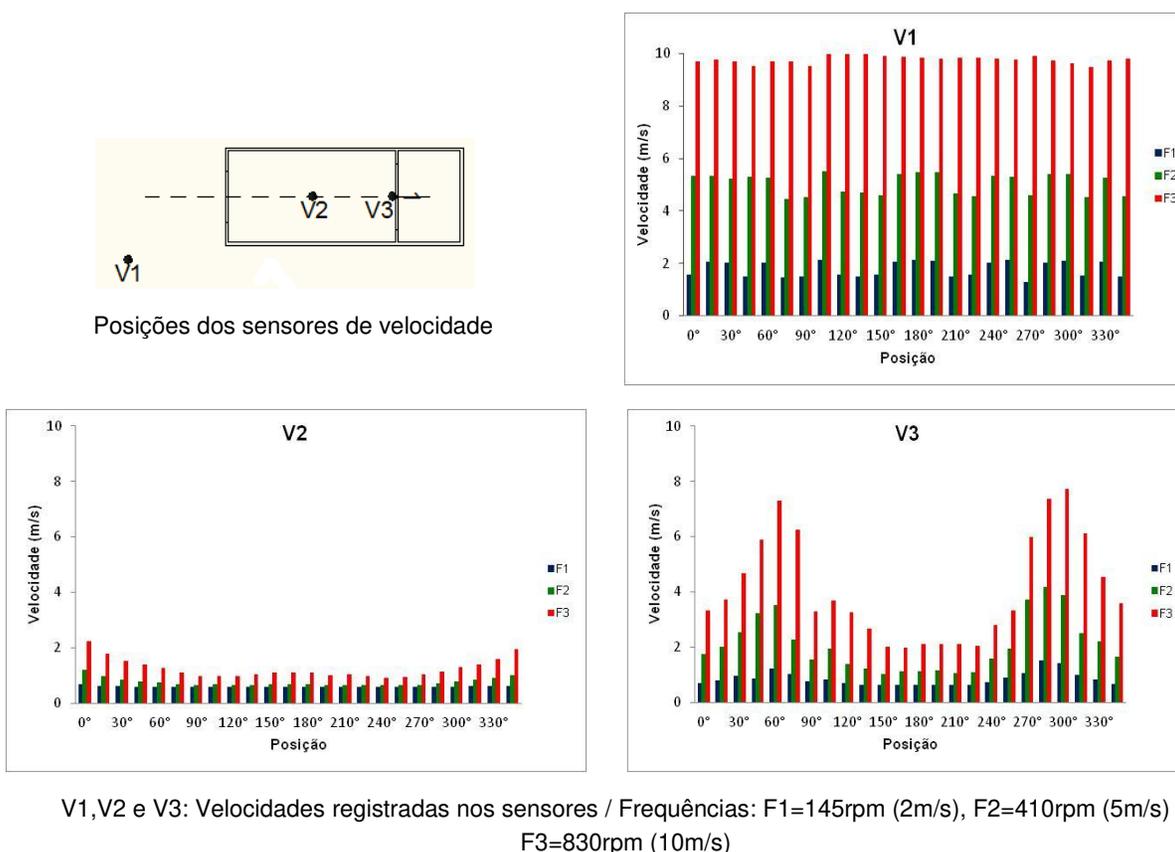


Figura 4.1: Velocidades do ar para a torre unidirecional

Na torre unidirecional percebe-se que as velocidades medidas no interior da edificação (V2) são maiores nas posições de 0° a 75° e de 270° a 345° pelo fato de sua abertura se localizar na direção do fluxo de ar gerado pelo túnel de vento. O mesmo ocorre com a torre (V3), mas entre as posições de 90° a 270° nota-se a permanência da velocidade

no interior da edificação (V2) mesmo com a diminuição de V3, mostrando que embora a abertura da edificação não esteja perpendicular ao vento, a torre faz com que sua ventilação continue constante (figura 4.1).

Para as velocidades identificadas na abertura superior da torre (V3), nota-se que há grandes variações entre os valores das posições extremas (iniciais e finais) e intermediárias, devido ao comportamento do fluxo de ar na altura desse sensor.

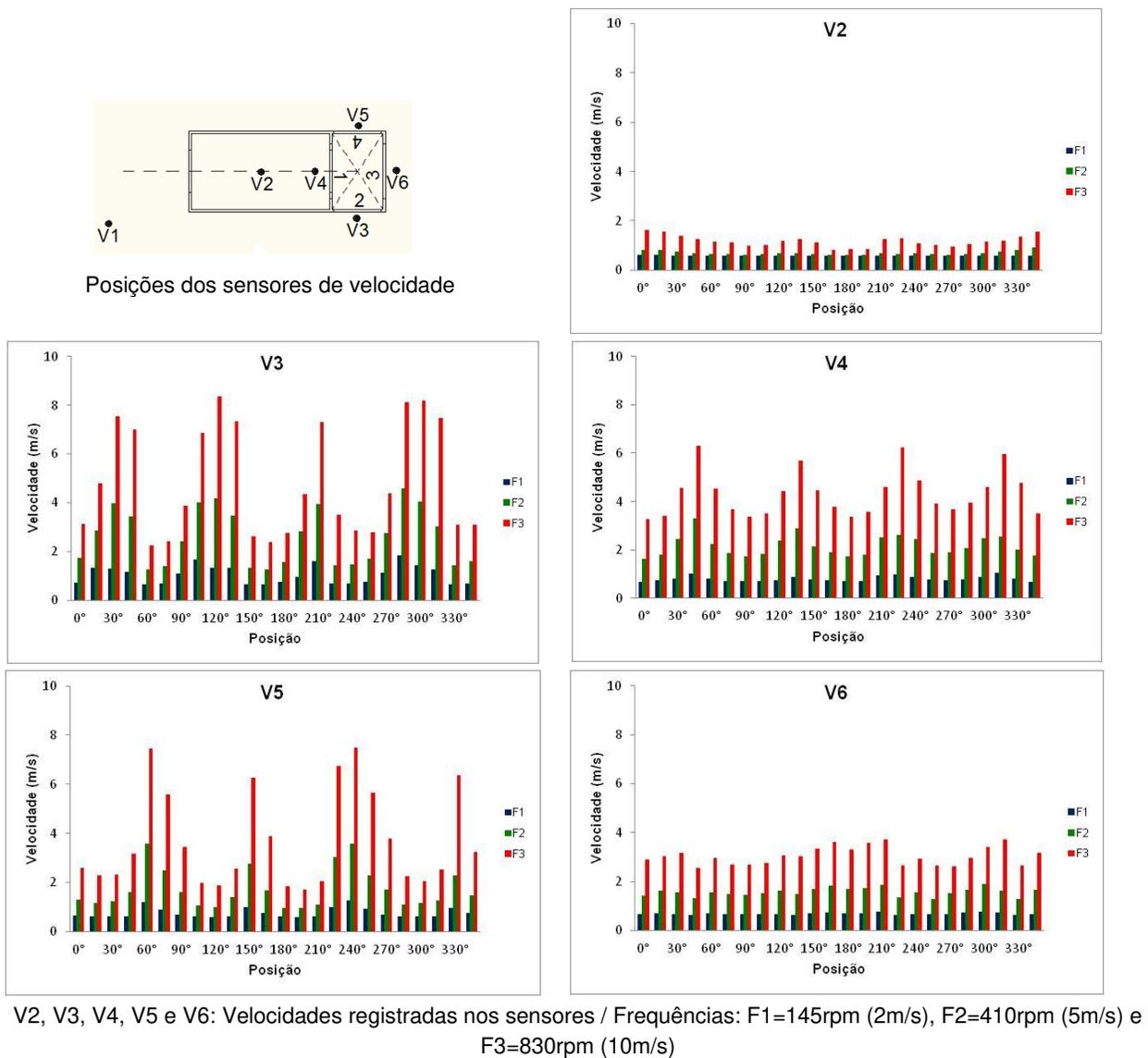
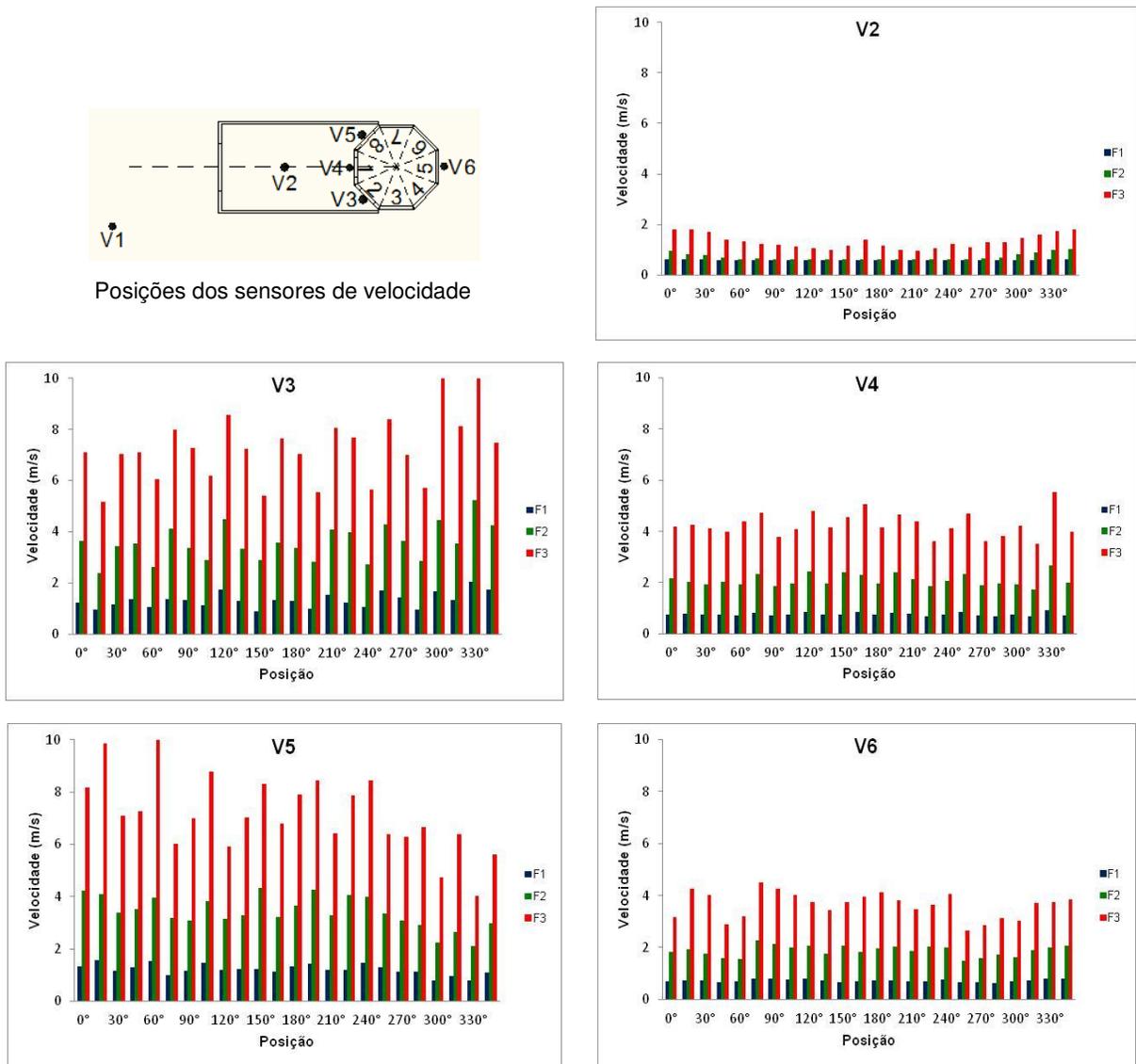


Figura 4.2: Velocidades do ar para a torre tetradirecional

Analisando-se a torre tetradirecional observa-se que o resultado é semelhante à unidirecional. Entretanto, entre as posições de 165° a 210° há uma queda na ventilação da edificação (V2) explicada pela ineficiência das aberturas laterais e posterior da torre, sendo V2 aumentada a partir de 210° (figura 4.2).



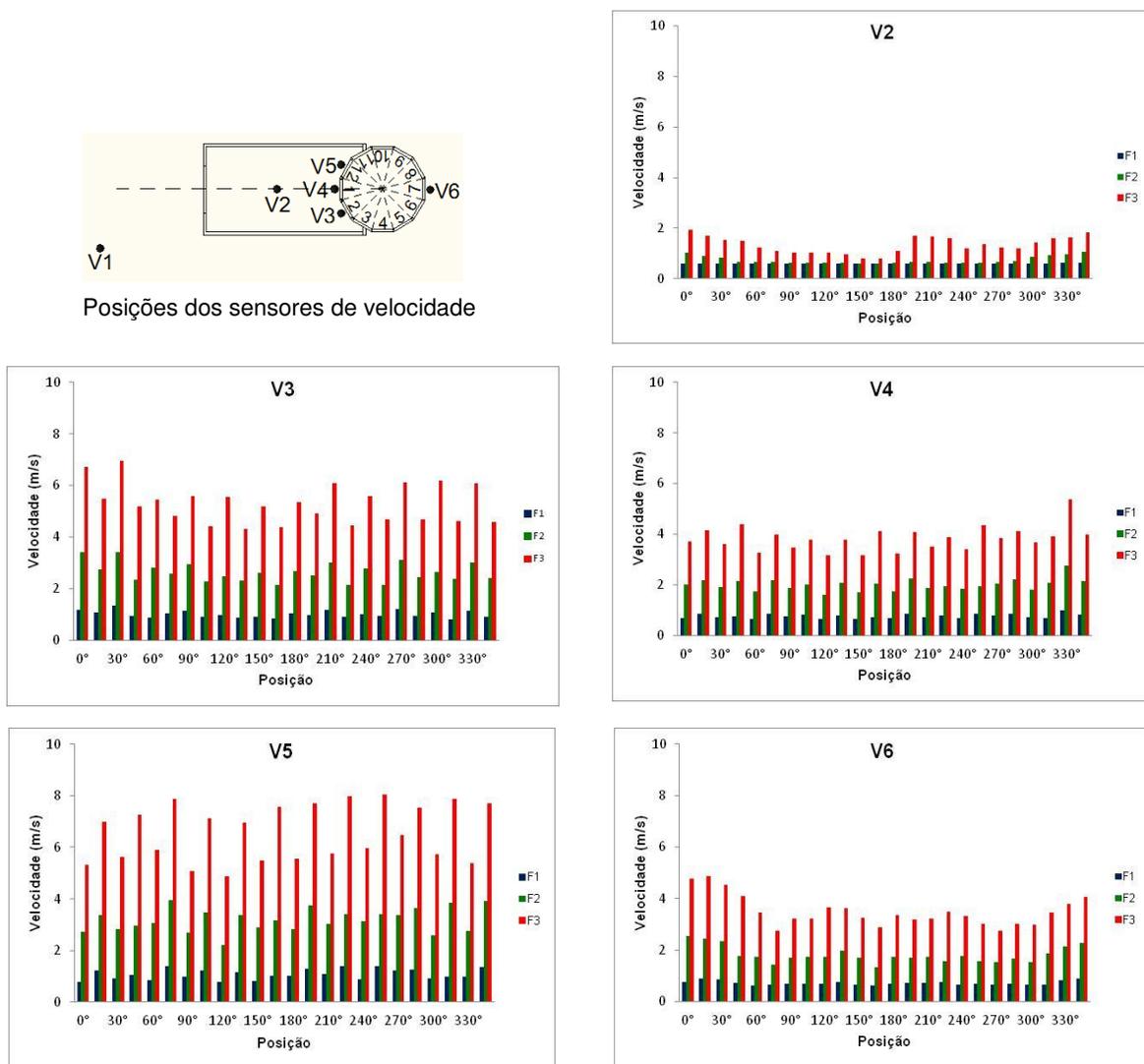
V2, V3, V4, V5 e V6: Velocidades registradas nos sensores / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Figura 4.3: Velocidades do ar para a torre octodirecional

A torre octodirecional apresenta o mesmo comportamento que as torres anteriores em

relação à ventilação interna da edificação (V2), mas no intervalo das posições de 90° a 270° percebe-se que os valores de V2 são maiores nessa torre, justificado pelo aumento do número de aberturas e sua distribuição otimizada (figura 4.3).

O comportamento da torre dodecadirecional assemelha-se ao da tetradirecional para V2, porém, em um intervalo menor, de 150° a 180°, fato explicado pela consequência do aumento do número de aberturas de menor área, deixando as divisórias no interior da torre mais próximas dificultando o movimento do ar nessas posições (figura 4.4).



V2, V3, V4, V5 e V6: Velocidades registradas nos sensores / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Figura 4.4: Velocidades do ar para a torre dodecadirecional

Nas torres unidirecional, tetradirecional e octodirecional percebe-se uma simetria entre os valores medidos pelo sensor interno à edificação (V_2), mostrando que nas posições acima de 180° , embora estejam em quadrantes diferentes, os valores de velocidade do ar são os mesmos.

Essa simetria não ocorre com a torre dodecadirecional, pois para as posições acima de 180° os valores aumentam desordenadamente, devido à proximidade entre as divisórias cruzadas.

Para as quatro torres analisadas, a frequência F1 gerou valores de velocidade quase constantes na maioria das posições para V_2 , pois sendo a menor frequência, a sua velocidade é diminuída ao colidir com as paredes divisórias, ao contrário de F2 e F3 que variaram conforme a posição por possuírem maior velocidade.

Nota-se que os valores medidos pelos sensores relacionam-se diretamente às frequências, isto é, quanto maior a frequência, maior a velocidade, e também, os valores de velocidade do ar internamente à edificação (V_2) diminuem à medida que a abertura inferior se distancia do fluxo de ar, pois a ventilação do ambiente interno depende também dessa abertura.

Observa-se que para as frequências F1 e F2, os valores da velocidade no interior da edificação (V_2) estão muito próximos nas posições de 90° a 270° da unidirecional, de 165° a 195° da tetradirecional, de 90° a 255° da octodirecional e de 90° a 180° da dodecadirecional, fato provocado certamente pela turbulência gerada no interior do túnel de vento.

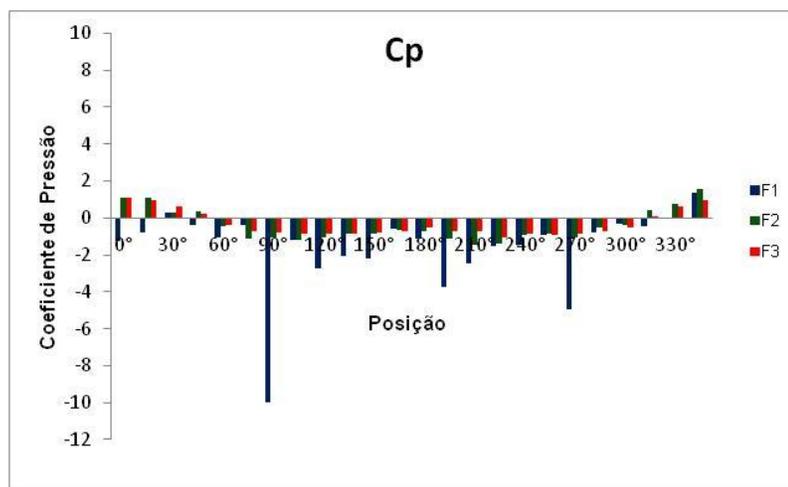
b) Ensaio de pressão

Os valores das diferenças de pressões realizadas no túnel de vento permitiram calcular o coeficiente de pressão (C_p), utilizando a equação 2.4 (b), cujos valores encontram-se representados nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Na torre unidirecional, o gráfico mostra que de 45° a 315° há uma queda nos valores de C_p , pois a abertura vai se distanciando da direção do fluxo de ar, dificultando sua entrada na torre. Entretanto, de 0° a 45° e de 315° a 345° os valores permanecem altos e quase constantes porque tais posições facilitam o deslocamento do fluxo de ar na torre (figura 4.5).



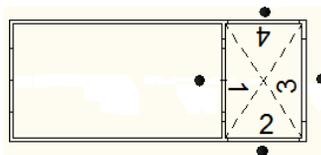
Posição do sensor de pressão



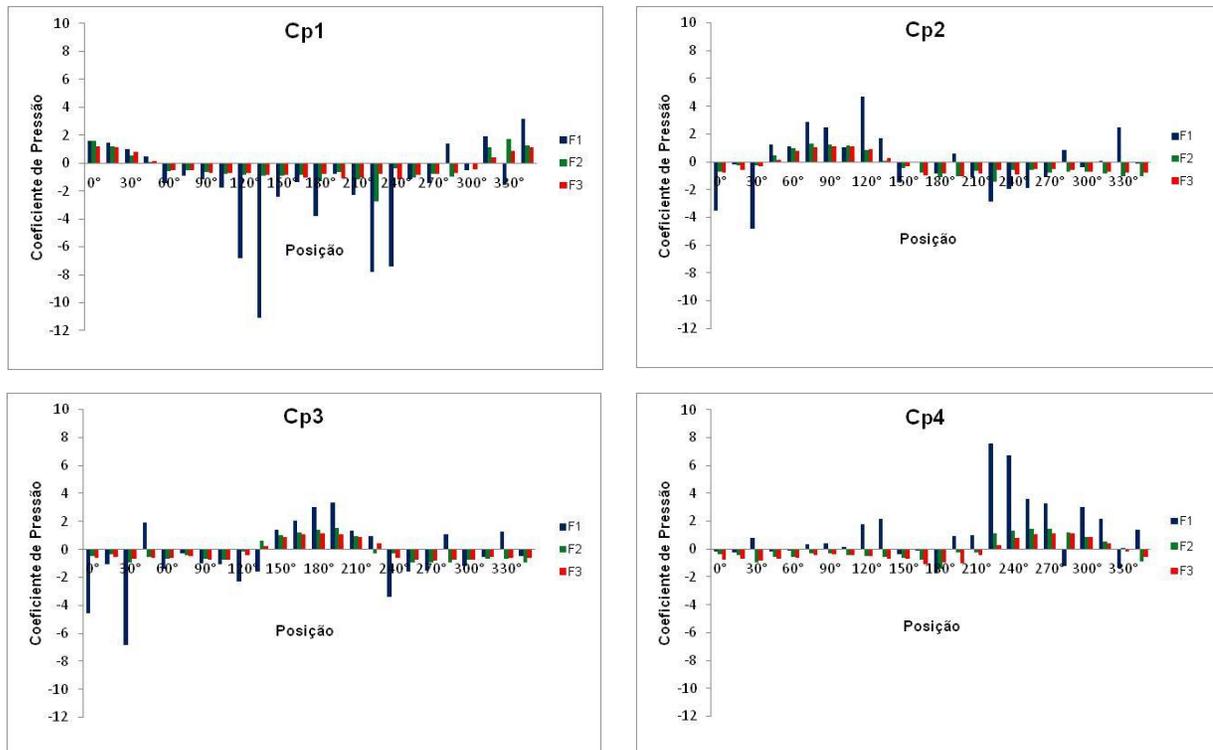
C_p : Coeficiente de pressão na abertura / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Figura 4.5: Coeficientes de pressão para a torre unidirecional

Os valores de C_p na torre tetradirecional não apresentaram mudanças bruscas em relação às posições adotadas, exceto nas posições 30°, 120°, 135°, 225° e 240°, para baixos valores de velocidade (figura 4.6).



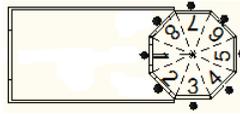
Posições dos sensores de pressão



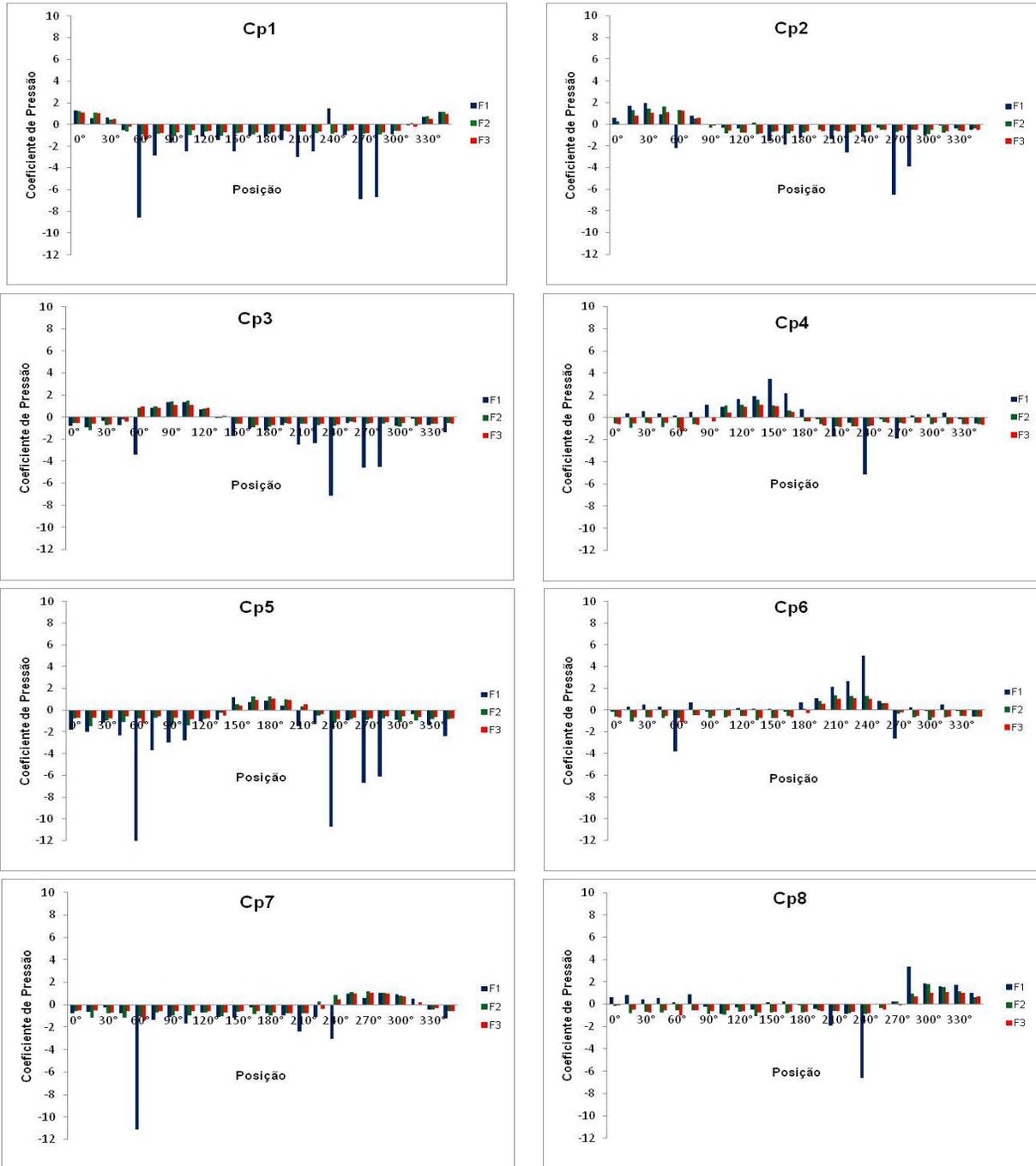
Cp1 a Cp4: Coeficientes de pressão nas respectivas aberturas / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Figura 4.6: Coeficientes de pressão para a torre tetradirecional

Analisando-se a torre octodirecional percebe-se que os valores de Cp variam bruscamente nas posições 60°, 150°, 240°, 270° e 285°, para baixas velocidades, enquanto que nas velocidades média e alta não há grandes variações, pois o número de aberturas é maior, facilitando a entrada do ar (figura 4.7).



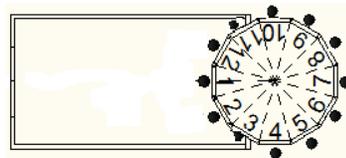
Posições dos sensores de pressão



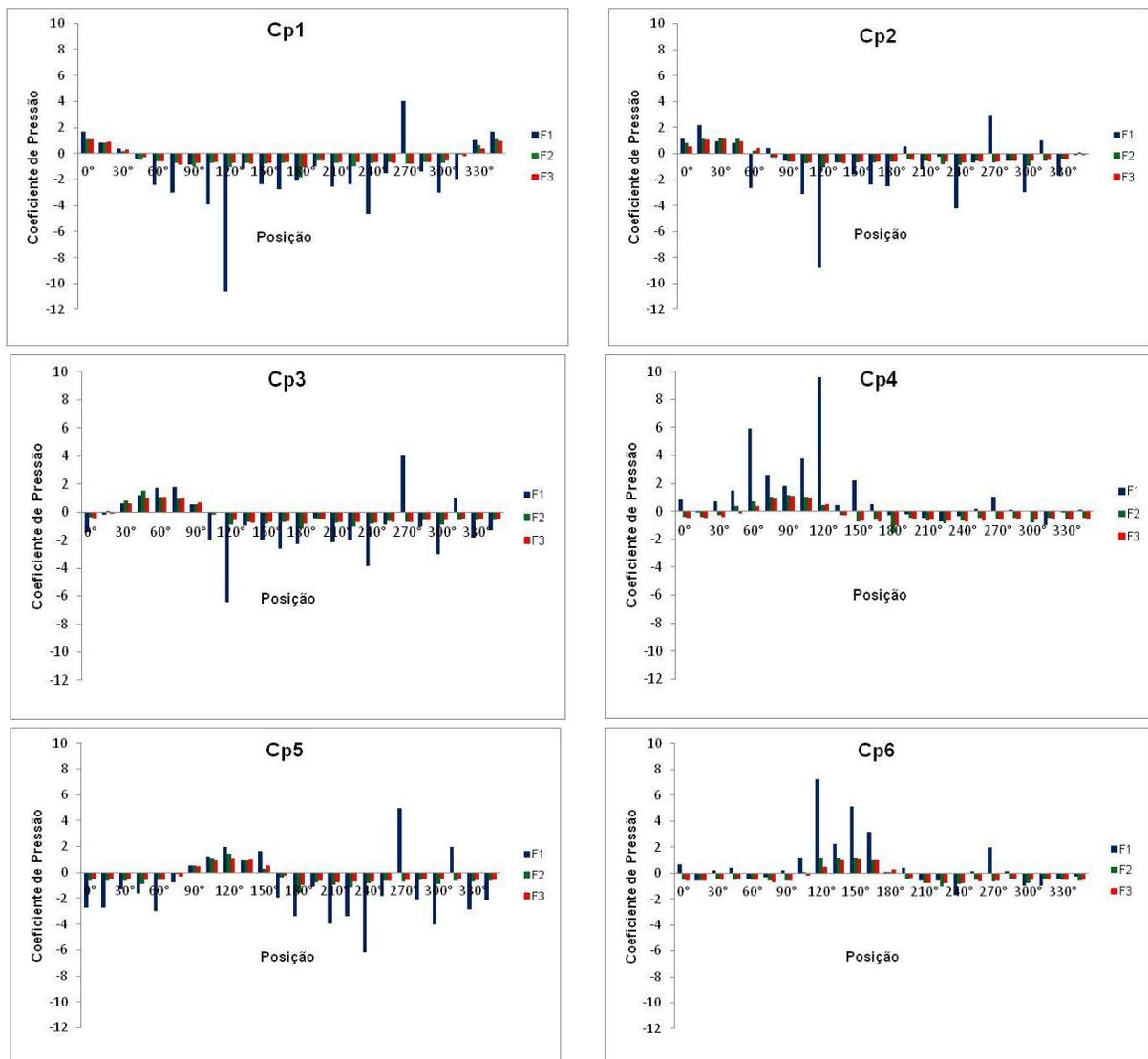
Cp1 a Cp8: Coeficientes de pressão nas respectivas aberturas / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

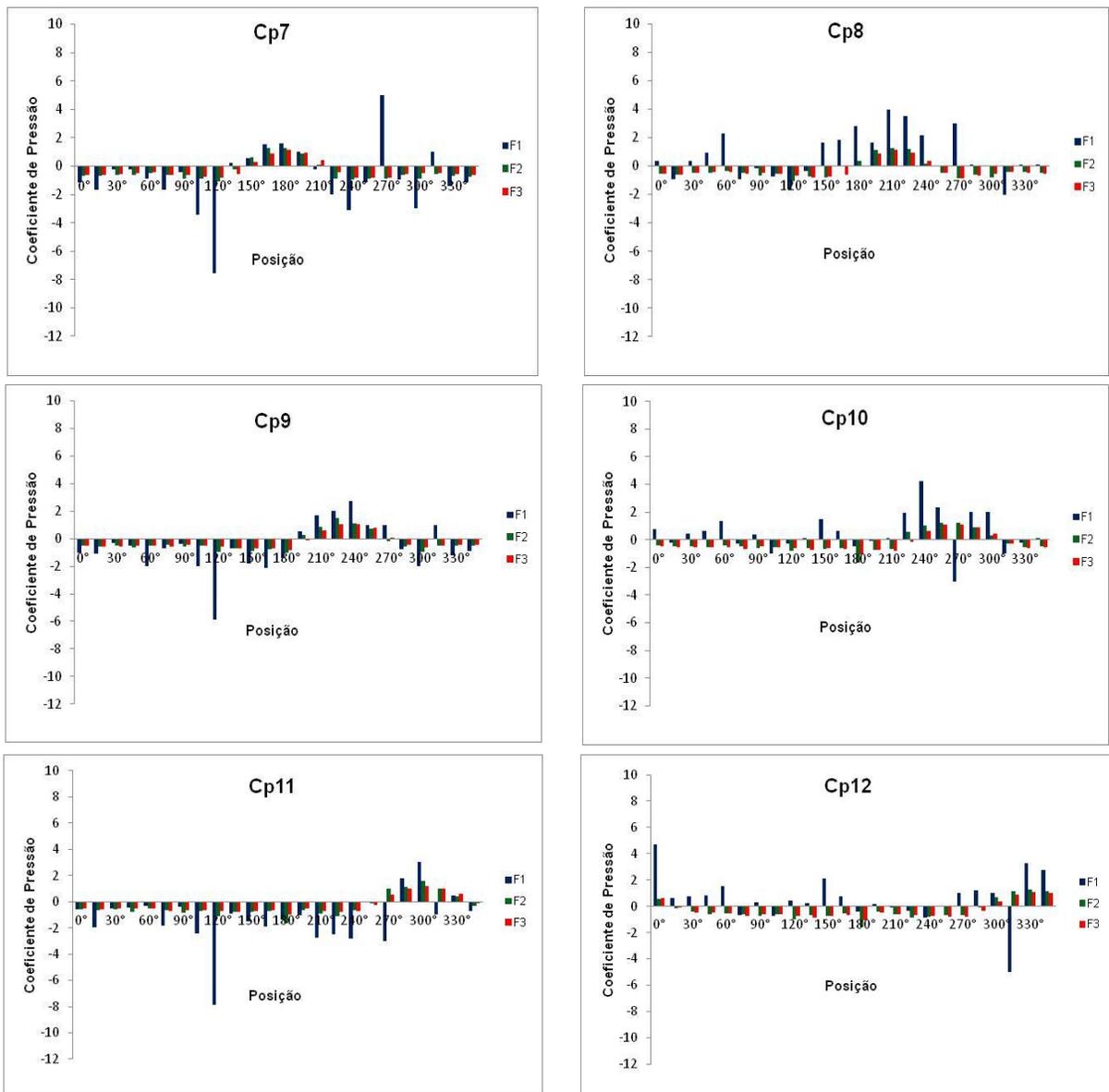
Figura 4.7: Coeficientes de pressão para a torre octodirecional

A torre dodecadirecional apresenta comportamento semelhante à octodirecional, mas com variações de valores de C_p menos bruscas na maioria das posições, fato explicado pelo aumento do número de aberturas, elevando as chances de entrada de ar (figura 4.8).



Posições dos sensores de pressão





Cp1 a Cp12: Coeficientes de pressão nas respectivas aberturas / Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Figura 4.8: Coeficientes de pressão para a torre dodecadirecional

Observando os resultados das quatro torres simuladas, percebe-se que os valores dos coeficientes de pressão podem ser positivos (indicando captação) ou negativos (indicando extração), os quais mostram que as torres, na maioria das posições, funcionam como extrator, ou seja, ocorre sota-vento em quase todas as aberturas.

Nota-se que os valores dos coeficientes de pressão geralmente são mais baixos para as frequências maiores (F2 e F3), e, em alguns casos, chegam a ser praticamente nulos, fato explicado pela elevada pressão total gerada na região dos sensores.

Embora os valores das frequências sejam bem diferentes entre si, observa-se uma igualdade nos valores de coeficientes de pressão em algumas posições, nas quais há uma geração de diferenças de pressão semelhantes, mesmo com as forças impostas pelo vento intensamente desiguais entre elas.

Há casos em que os coeficientes de pressão apresentam valores positivos e negativos para uma mesma posição, porque dependendo da intensidade da força do vento, podem ser geradas diferenças de pressão com sinais opostos em um mesmo ponto.

Em todos os coeficientes de pressão analisados percebe-se que em algumas posições, para as quatro torres e frequência F1, há valores elevados quando comparados aos demais, fato explicado pela formação localizada de vórtices sobre as paredes.

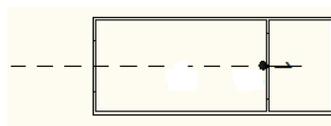
c) Relação entre os valores do coeficiente de pressão e de velocidade na ventilação da edificação

Nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram-se os sinais dos coeficientes de pressão (C_p) para cada frequência do túnel e posição da torre, os quais representam o sentido do vento, isto é, indica a atuação da torre como captador (C_p positivo) ou extrator (C_p negativo), podendo ocorrer os dois sistemas para uma mesma posição em torres com mais de uma abertura.

Observando-se essas tabelas nota-se que as quatro torres atuam como extrator na maioria das posições, pois é destacado um grande número de C_p s negativos. Entretanto, essa pesquisa aborda as torres de vento como captadores (C_p s positivos), permitindo assim descartar os C_p s negativos nas análises.

A torre unidirecional possui duas posições em que o C_p é positivo para todas as frequências consideradas no ensaio: 30° e 345°, sendo essa última a que apresenta maiores valores de velocidade do ar interno à edificação (V2), promovendo assim a melhor ventilação (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Sinais dos coeficientes de pressão (C_p) na abertura da torre unidirecional



Posição do sensor de pressão

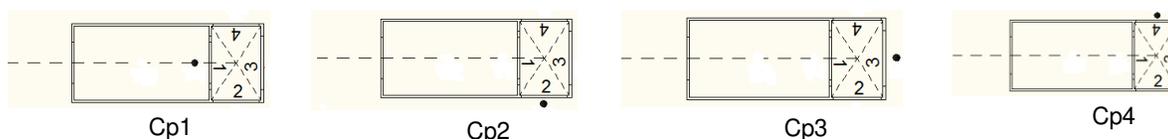
Frequências X Posições	Cp		
	F1	F2	F3
0°	-	+	+
15°	-	+	+
30°	+	+	+
45°	-	+	+
60°	-	-	-
75°	-	-	-
90°	-	-	-
105°	-	-	-
120°	-	-	-
135°	-	-	-
150°	-	-	-
165°	-	-	-
180°	-	-	-
195°	-	-	-
210°	-	-	-
225°	-	-	-
240°	-	-	-
255°	-	-	-
270°	-	-	-
285°	-	-	-
300°	-	-	-
315°	-	+	+
330°	-	+	+
345°	+	+	+

Cp: Coeficiente de pressão na abertura/ Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

As posições de 45° e 315° possuem o maior número de C_p positivo para as três frequências ensaiadas na torre tetradirecional, e ambas, apresentam os mesmos

valores de velocidade do ar no interior da edificação (V2) e conseqüentemente igual eficiência na ventilação (tabela 4.2).

Tabela 4.2: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre tetradirecional



Posições dos sensores de pressão

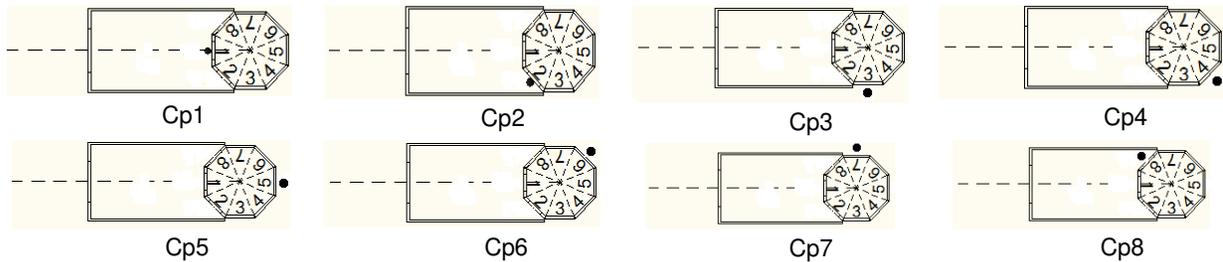
Frequências X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4		
	F1	F2	F3									
0°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-
45°	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
60°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
75°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-
90°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-
105°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-
120°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-
135°	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-
150°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
165°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
180°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
195°	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-
210°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
225°	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
240°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
255°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
270°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
285°	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	+
300°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
315°	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+
330°	-	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-
345°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Após a análise dos Cps positivos, considerando as três frequências nos ensaios da torre octodirecional, verificou-se que as posições de 15°, 30°, 75° e 315° possuem

elevados números desses Cps, tendo as duas primeiras posições os maiores valores de velocidade do ar interno à edificação (V2), oferecendo uma boa ventilação (tabela 4.3).

Tabela 4.3: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre octodirecional



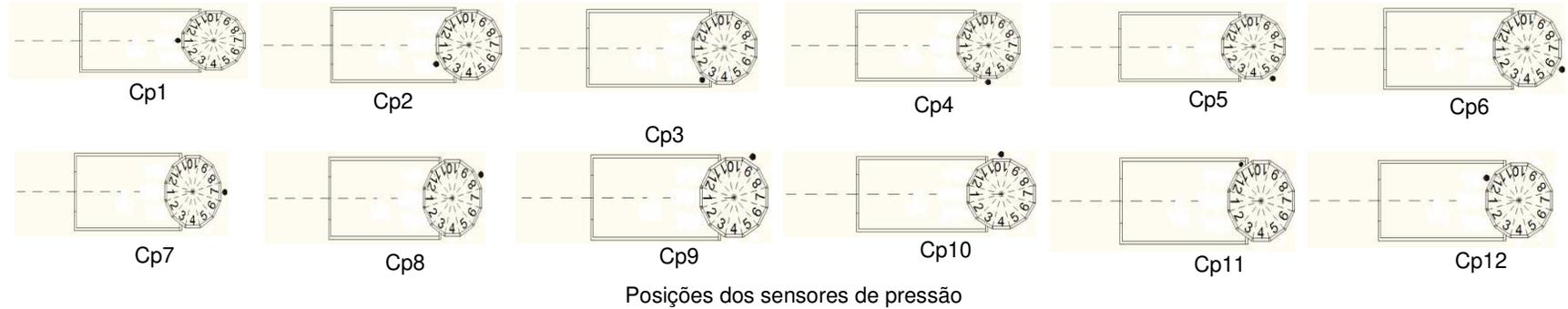
Posições dos sensores de pressão

Frequências X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4			Cp5			Cp6			Cp7			Cp8		
	F1	F2	F3																					
0°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
15°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
30°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
45°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
60°	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
75°	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
90°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
135°	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
150°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
165°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-
180°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
195°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
210°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
225°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-
240°	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
255°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
270°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
285°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+
300°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
315°	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+
330°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
345°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

A torre dodecadirecional apresenta duas posições com grande número de Cps positivos considerando as três frequências ensaiadas: 30° e 270°, sendo que a primeira posição apresenta os maiores valores de velocidade do ar no interior da edificação (V2) (tabela 4.4).

Tabela 4.4: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre dodecadirecional



Frequências X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4			Cp5			Cp6			Cp7			Cp8			Cp9			Cp10			Cp11			Cp12				
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3																										
0°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+			
15°	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-		
30°	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-		
45°	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-		
60°	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-		
75°	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
90°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	
105°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
120°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
135°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	
150°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	
165°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	
180°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
195°	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
210°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
225°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
240°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
255°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
270°	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-
285°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
300°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
315°	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
330°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
345°	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Frequências: F1=145rpm (2m/s), F2=410rpm (5m/s) e F3=830rpm (10m/s)

Analisando-se os valores de V2 para cada torre (figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) é observado que além do número de aberturas da torre, os valores de velocidade do ar interno à edificação estão relacionados, também, com as dimensões dessas aberturas, as quais determinam a distância entre as divisórias, podendo favorecer ou dificultar a entrada do ar na torre.

Dentre as quatro torres analisadas, nota-se que a tetradirecional apresenta o maior número de coeficientes de pressão (Cp) positivos (34%), isto é, essa torre se destaca como captador quando comparada às demais (tabela 4.5). Entretanto, considerando a ventilação interna da edificação, percebe-se um melhor desempenho das torres octo e dodecadirecional, as quais apresentam maiores valores de velocidade do ar interno (V2), proporcionando uma maior troca de ar.

Tabela 4.5: Quantidade de coeficientes de pressão (Cp) nas torres analisadas

Torres X Sinais	+	+ (%)	-	- (%)	Total
Unidirecional	17	24	55	76	72
Tetradirecional	98	34	190	66	288
Octodirecional	157	27	419	73	576
Dodecadirecional	245	28	619	72	864

4.2. Simulações no software CFX®

a) Simulações de velocidade

As imagens de vetores das simulações de velocidade realizadas no software CFX® encontram-se representadas nas figuras de 4.9 a 4.24, e, as de contorno, no Apêndice A.

Para os três casos simulados ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), na torre unidirecional a 0° , nota-se a diminuição da velocidade do ar à medida que se afasta das aberturas, tanto da superior como das inferiores, com valores próximos de 0m/s . A velocidade mais alta atingida no interior da edificação está em torno de $0,7\text{m/s}$ (para V_{f1}), $1,7\text{m/s}$ (para V_{f2}) e $3,4\text{m/s}$ (para V_{f3}). Embora os três perfis de velocidade sejam semelhantes, o que apresenta melhor distribuição do ar interno é o de velocidade de simulação de 10m/s (V_{f3}) (figura 4.9).

Na torre unidirecional a 90° , para as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), percebe-se que não há uma circulação de ar adequada no interior da edificação (as velocidades são próximas de 0m/s), fato provocado pela posição não favorável da abertura da torre em relação ao vento. Dos três perfis considerados (V_{f1} , V_{f2} e V_{f3}), o de maior velocidade (V_{f3}) mostra maior circulação interna do ar, pois não gera pontos de ar parado (figura 4.10).

Considerando as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), para a torre unidirecional a 180° , observa-se que há uma circulação de ar maior em comparação à posição de 90° , pois próximo às aberturas inferiores ela aumenta, atingindo valores em torno de $0,8\text{m/s}$ (para V_{f1}), 2m/s (para V_{f2}) e $4,2\text{m/s}$ (para V_{f3}). Entretanto, apresenta uma distribuição de ar inadequada por não estar em uma posição favorável à incidência do vento e possuir apenas uma abertura (figura 4.11).

Para as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), na torre unidirecional a 270° , repara-se que para a velocidade de 5m/s (V_{f2}), a velocidade do ar interno à edificação está em torno de 0m/s , enquanto para as outras (V_{f1} e V_{f3}), as velocidades são de $0,85\text{m/s}$ (para V_{f1}) e $4,3\text{m/s}$ (para V_{f3}) próximas às aberturas inferiores. Neste caso, considerando os três perfis analisados, o que apresenta maior circulação de ar interno é o de $V=10\text{m/s}$ (V_{f3}), pois não possui pontos de ar parado (figura 4.12).

Na torre tetradirecional a 0° , para as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), percebe-se que há uma maior circulação de ar, tanto no interior da torre como da edificação com velocidades em torno de $1,8\text{m/s}$ (para V_{f1}), $4,5\text{m/s}$ (para V_{f2}) e 9m/s (para V_{f3}), fato explicado pelo número de aberturas, as quais aumentam o poder de captação do vento por essa torre. Considerando a semelhança entre os três perfis de velocidade, nota-se uma maior distribuição do ar interno no caso em que a velocidade é de 10m/s (V_{f3}) (figura 4.13).

Considerando as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), para a torre tetradirecional a 90° , observa-se que houve uma queda nos valores das velocidades internas da edificação e da torre em relação à de 0° , com valores que atingem no máximo 1m/s (para V_{f1}), $2,4\text{m/s}$ (para V_{f2}) e 5m/s (para V_{f3}), pois a abertura da edificação está paralela ao vento, dificultando a circulação de ar. Dentre os três casos estudados, o de maior velocidade ensaiada (V_{f3}) apresenta menor concentração de ar no interior da edificação (figura 4.14).

Para as três velocidades simuladas ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), na torre tetradirecional a 180° , verifica-se que enquanto o ar no interior da torre atinge velocidades em torno de 2m/s (para V_{f1}), 6m/s (para V_{f2}) e 12m/s (para V_{f3}), na edificação ficam próximas de 0m/s nos três casos, salvo próximo à abertura, a qual se situa oposta ao vento. Dos perfis analisados, o de $V=10\text{m/s}$ (V_{f3}) apresenta uma menor distribuição interna do ar, devido à concentração do mesmo próximo às aberturas inferiores (figura 4.15).

Analisando os três casos simulados ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), para a torre tetradirecional a 270° , nota-se que em nenhum deles ocorre uma circulação interna do ar adequada, pois tanto na torre como na edificação, as velocidades do ar interno apresentam baixos valores, sendo que no caso da torre não ultrapassa 1m/s (para V_{f1}), $2,2\text{m/s}$ (para V_{f2}) e 5m/s (para V_{f3}), e, na edificação giram em torno de 0m/s . O pior caso é o de $V=2\text{m/s}$ (V_{f1}), o qual gera ar concentrado próximo às aberturas, ao

contrário de $V=5\text{m/s}$ ($Vf2$) e $V=10\text{m/s}$ ($Vf3$), as quais apresentam um aumento da velocidade do ar perto das aberturas (figura 4.16).

Na torre octodirecional a 0° , para as três velocidades simuladas ($Vf1=2\text{m/s}$, $Vf2=5\text{m/s}$ e $Vf3=10\text{m/s}$), percebe-se que há uma maior distribuição interna do ar, pois na torre as velocidades do ar atingem 2m/s (para $Vf1$), 5m/s (para $Vf2$) e 10m/s (para $Vf3$), e na edificação chegam a $1,9\text{m/s}$ (para $Vf1$), $4,7\text{m/s}$ (para $Vf2$) e $9,5\text{m/s}$ (para $Vf3$), fato provocado pelo aumento do número de aberturas em relação à tetradirecional, aumentando a captação de ar pela torre. Nos três casos não é notada uma concentração de ar em nenhuma parte da edificação e a velocidade do ar cresce próximo às aberturas (figura 4.17).

Considerando as três velocidades simuladas ($Vf1=2\text{m/s}$, $Vf2=5\text{m/s}$ e $Vf3=10\text{m/s}$), para a torre octodirecional a 90° , observa-se que não ocorre uma boa circulação de ar interno na edificação e na torre, em comparação à octodirecional a 0° , pois as velocidades do ar não ultrapassam $0,9\text{m/s}$ (para $Vf1$), 3m/s (para $Vf2$) e 5m/s (para $Vf3$) na torre, e, ficam próximas a 0m/s na edificação para os três casos. Entretanto, não ocorre concentração de ar próximo às aberturas inferiores, ao contrário da área próxima ao teto da edificação, como é percebido na figura 4.18.

Ao analisar as três velocidades simuladas ($Vf1=2\text{m/s}$, $Vf2=5\text{m/s}$ e $Vf3=10\text{m/s}$), na torre octodirecional a 180° , repara-se que não há uma ventilação interna adequada nos três casos, porque ocorre uma concentração de ar no interior da torre próximo ao encontro das divisórias, onde as velocidades atingem $2,4\text{m/s}$ (para $Vf1$), 6m/s (para $Vf2$) e 12m/s (para $Vf3$), dificultando a sua passagem ao interior da edificação, na qual a velocidade se aproxima a 0m/s em todas as simulações, gerando concentração de ar perto das aberturas e do teto (figura 4.19).

Para as três velocidades simuladas ($Vf1=2\text{m/s}$, $Vf2=5\text{m/s}$ e $Vf3=10\text{m/s}$), na torre octodirecional a 270° , é verificado que não ocorre uma adequada distribuição do ar interno, fato explicado pelos baixos valores de velocidade do ar, os quais não

ultrapassam 1m/s (para Vf1), 3m/s (para Vf2) e 5m/s (para Vf3) no interior da torre, e, próximos a 0m/s na edificação, nos três casos, destacando-se uma concentração de ar perto do teto e aberturas inferiores. Além disso, existe uma concentração de ar nas aberturas superiores como consequência da dificuldade da passagem do ar da torre para a edificação (figura 4.20).

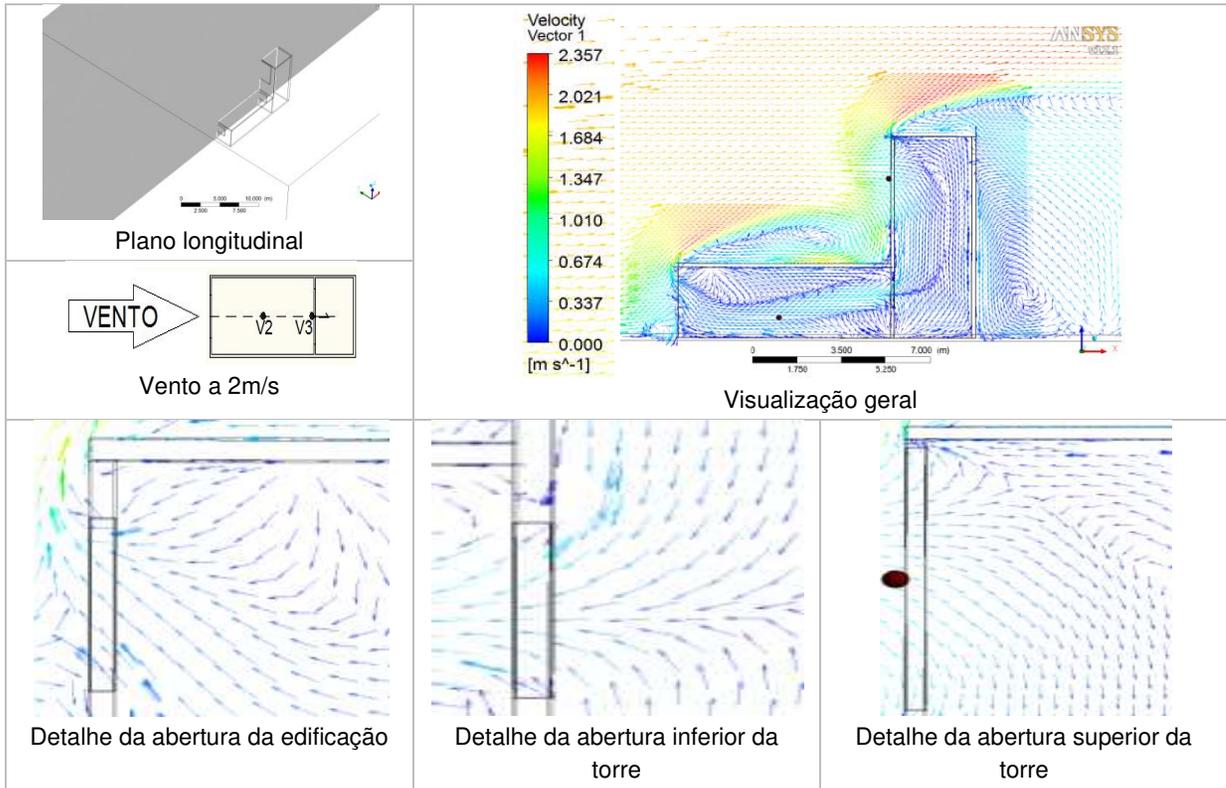
Na torre dodecadirecional a 0°, para as três velocidades simuladas (Vf1=2m/s, Vf2=5m/s e Vf3=10m/s), nota-se que existe uma ventilação interna apropriada, pois os valores da velocidade do ar giram em torno de 2,1m/s (para Vf1), 5,2m/s (para Vf2) e 10,2m/s (para Vf3) no interior da torre, e 1,7m/s (para Vf1), 4,1m/s (para Vf2) e 8,2m/s (para Vf3) na edificação, a qual também não apresenta pontos de ar concentrado em seu interior. Entretanto, há uma concentração de ar nas aberturas superiores da torre provocado pela proximidade entre as divisórias, que dificultam o movimento do ar (figura 4.21).

Considerando as três velocidades simuladas (Vf1=2m/s, Vf2=5m/s e Vf3=10m/s), para a torre dodecadirecional a 90°, observa-se que não há uma boa circulação do ar interno, comparado à de 0°, sendo notado baixos valores de velocidade do ar: 1m/s (para Vf1), 2,4m/s (para Vf2) e quase 0m/s (para Vf3) no interior da edificação e da torre. Esse último valor é explicado pela concentração de ar nas aberturas inferiores da torre. Assim como na posição anterior (a 0°), o ar também ficou concentrado nas aberturas superiores da torre pelo mesmo motivo relatado (figura 4.22).

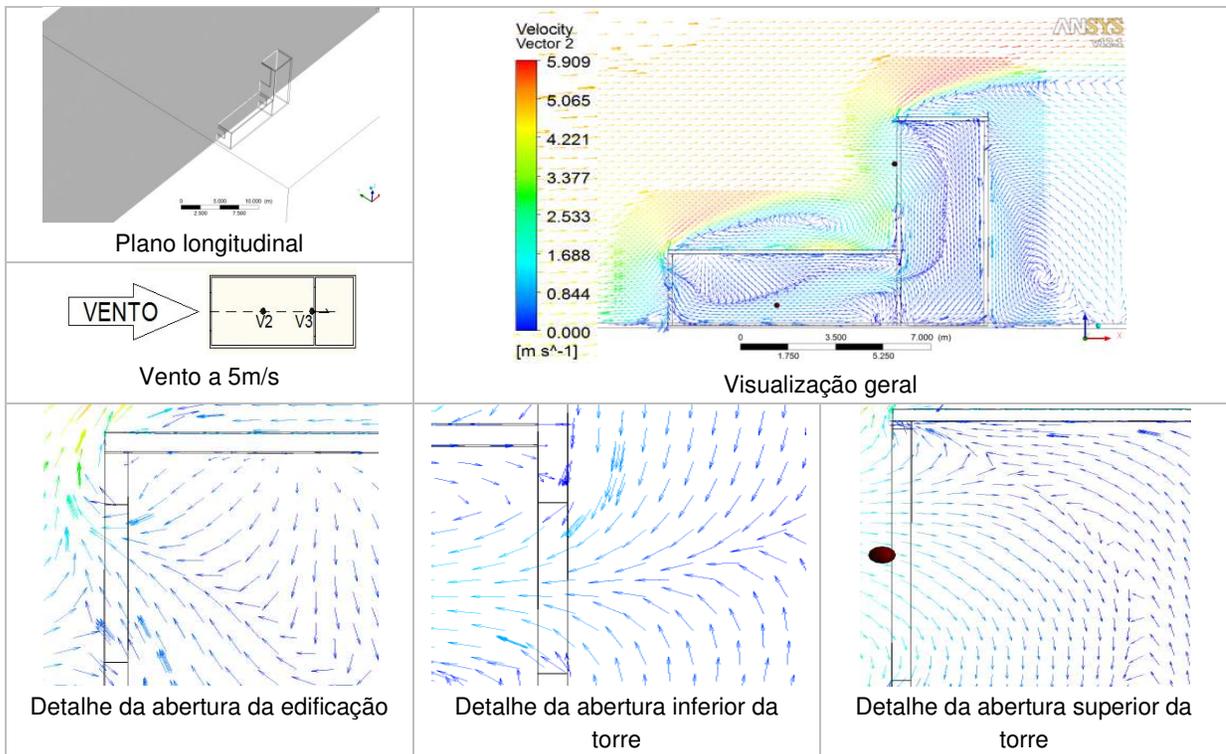
Analisando os três casos simulados (Vf1=2m/s, Vf2=5m/s e Vf3=10m/s), para a torre dodecadirecional a 180°, repara-se que a distribuição interna do ar da torre e da edificação apresentam divergências em seus valores de velocidade, visto que enquanto no interior da torre os valores chegam a 2,2m/s (para Vf1), 5,5m/s (para Vf2) e 11m/s (para Vf3), na edificação giram em torno de 0m/s para as três situações. Isso é provocado pela concentração de ar nas aberturas inferiores da torre e da edificação, o qual impede a entrada do ar captado (figura 4.23).

Para as três velocidades simuladas ($Vf1=2\text{m/s}$, $Vf2=5\text{m/s}$ e $Vf3=10\text{m/s}$), na torre dodecadirecional a 270° , percebe-se que não ocorre uma ventilação adequada do ar interno, tanto na torre quanto na edificação, sendo que os valores da velocidade do ar para as duas construções não ultrapassam 1m/s (para $Vf1$), $2,4\text{m/s}$ (para $Vf2$) e 5m/s (para $Vf3$). Isso acontece devido à concentração de ar na parte superior da torre e próximo às aberturas inferiores da torre e da edificação, e nos tetos das mesmas, o que dificulta a entrada e saída do ar captado (figura 4.24).

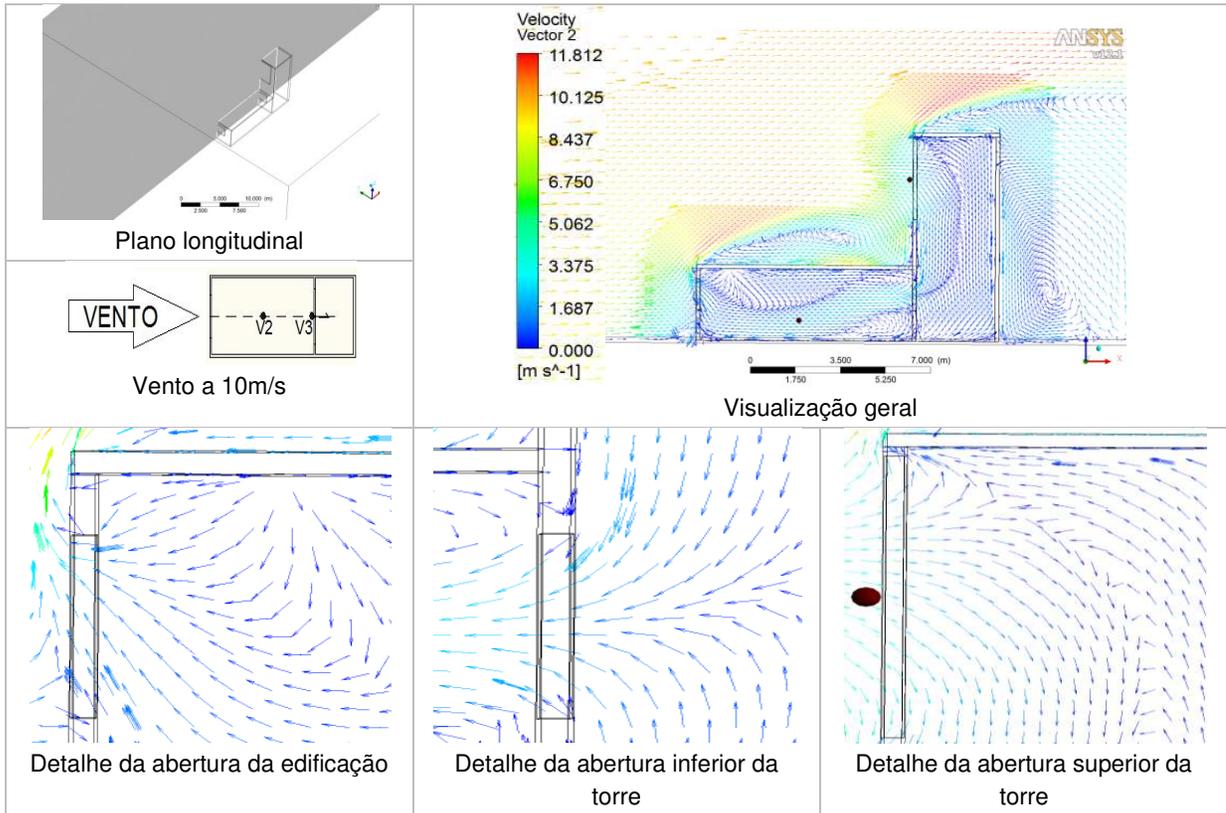
a)



b)



c)



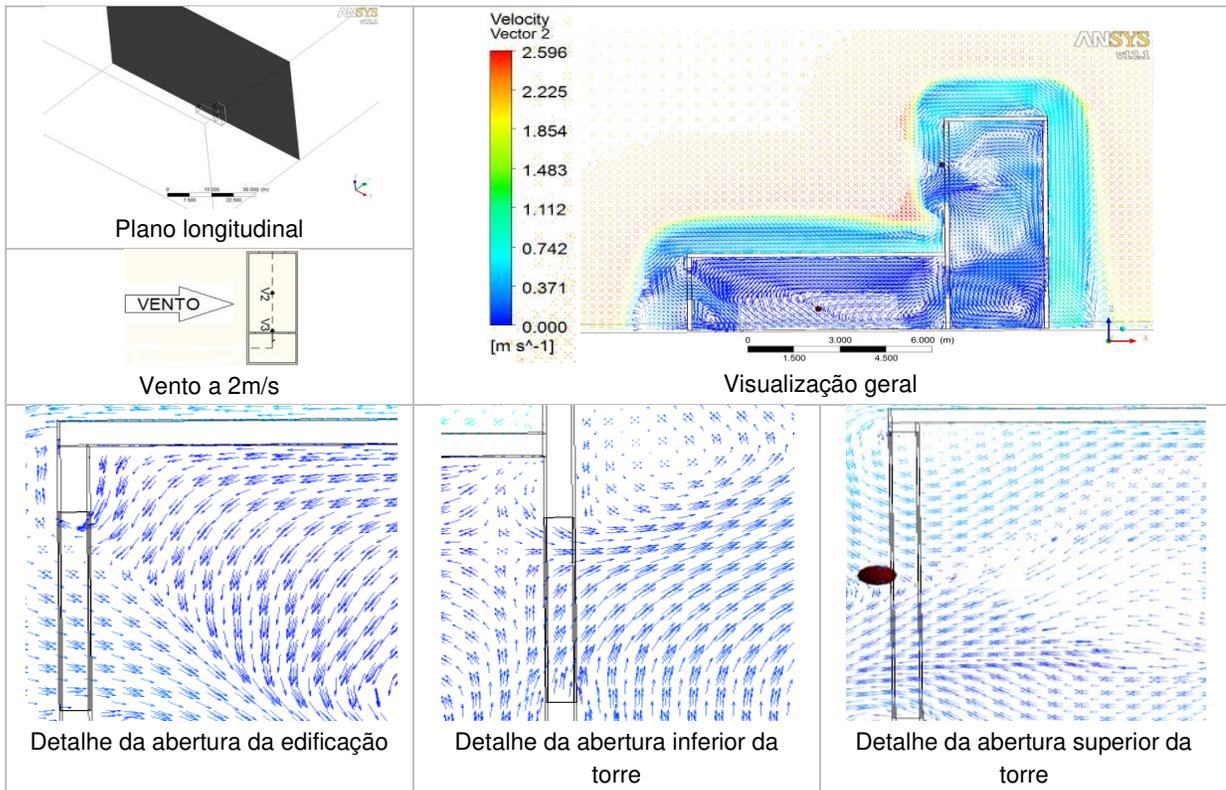
V2 e V3: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1: posição da abertura da torre

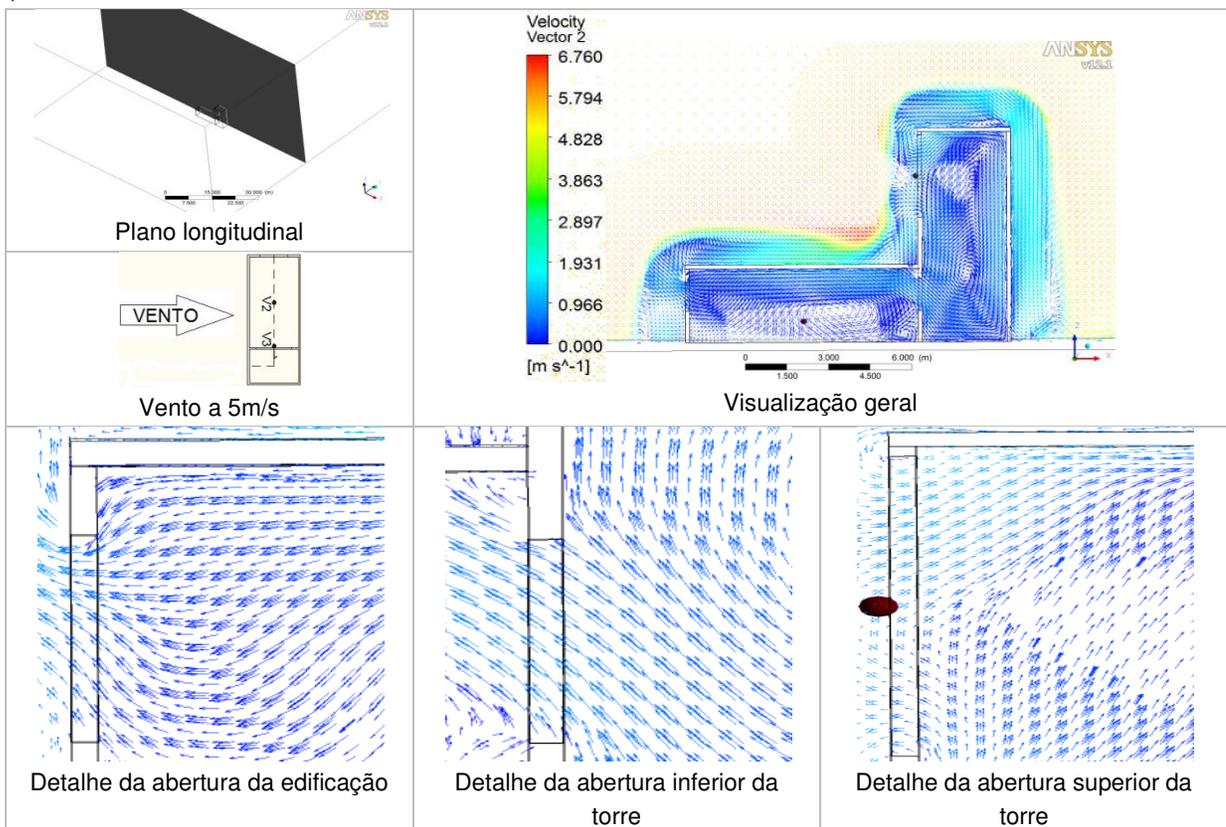
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.9 a, b, c: Vetores de velocidade do vento para a torre unidirecional a 0º

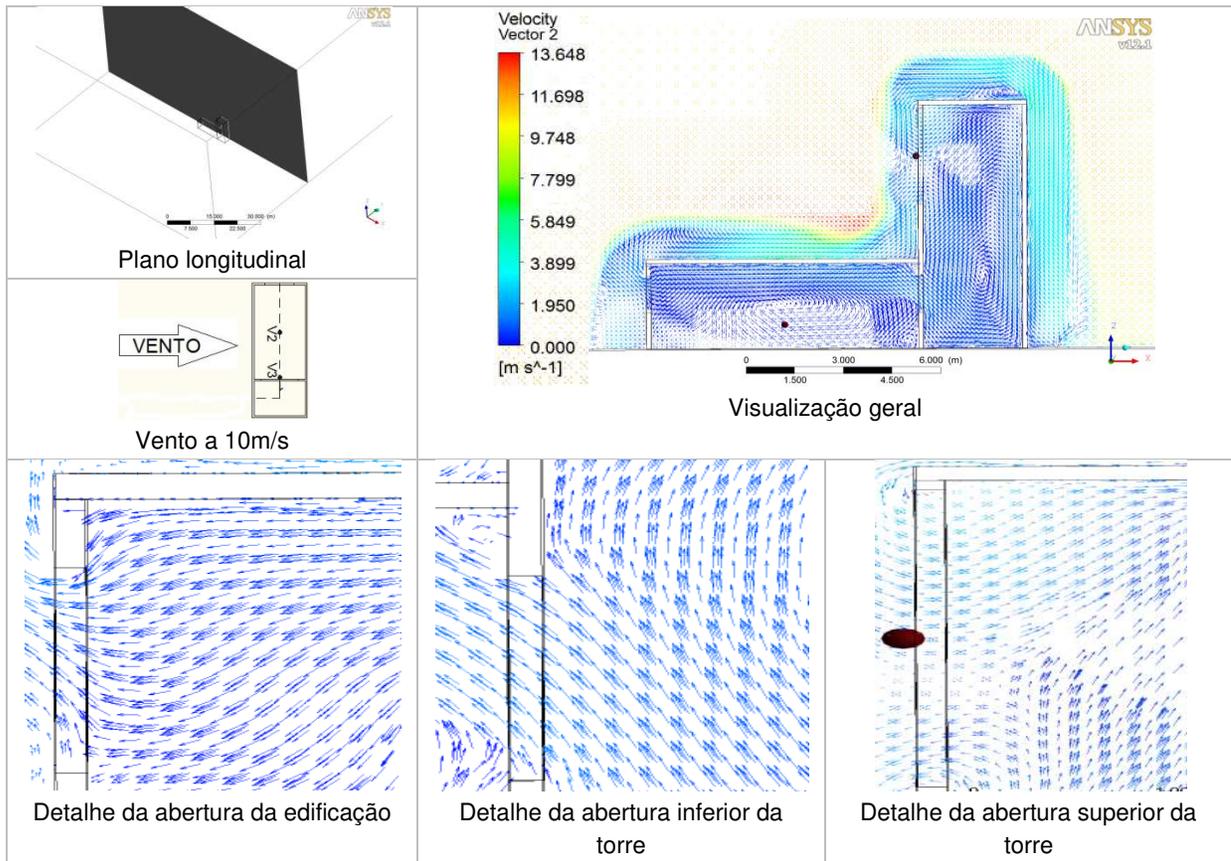
a)



b)



c)



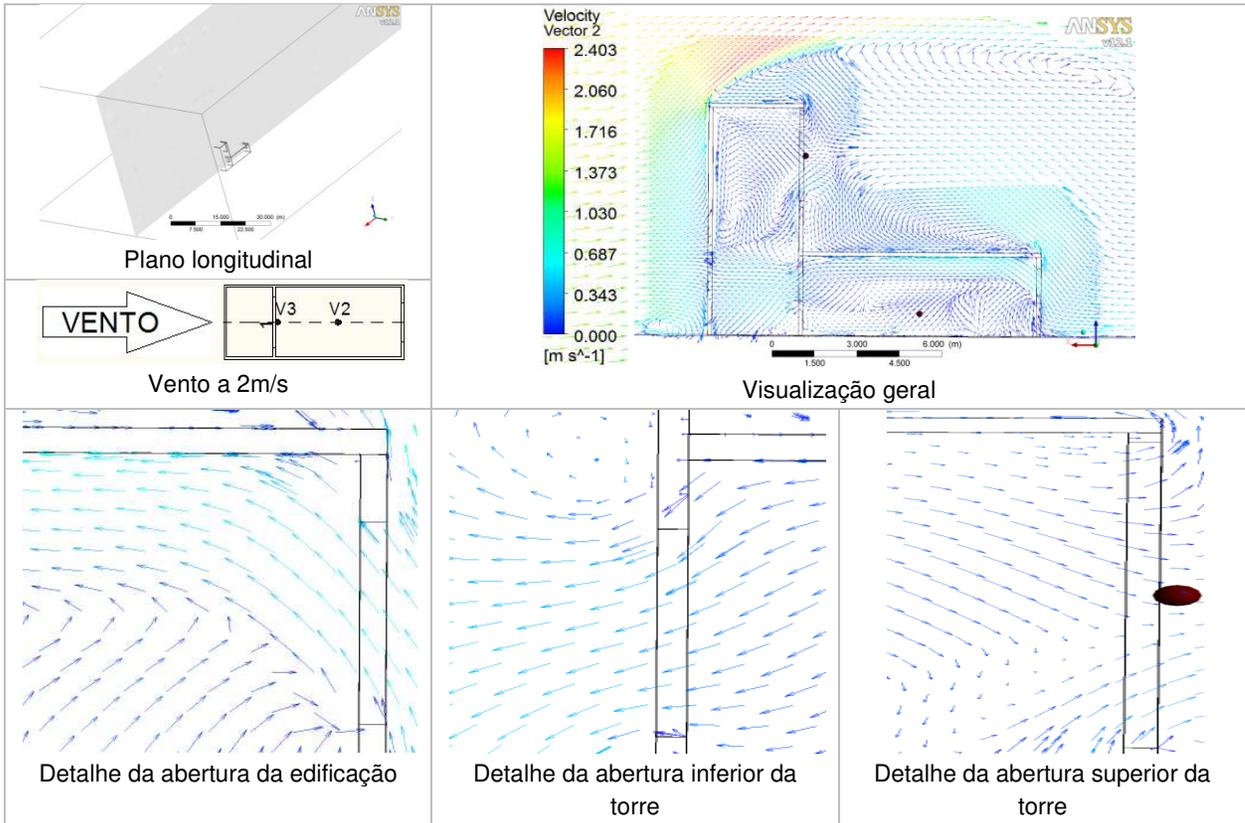
V2 e V3: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1: posição da abertura da torre

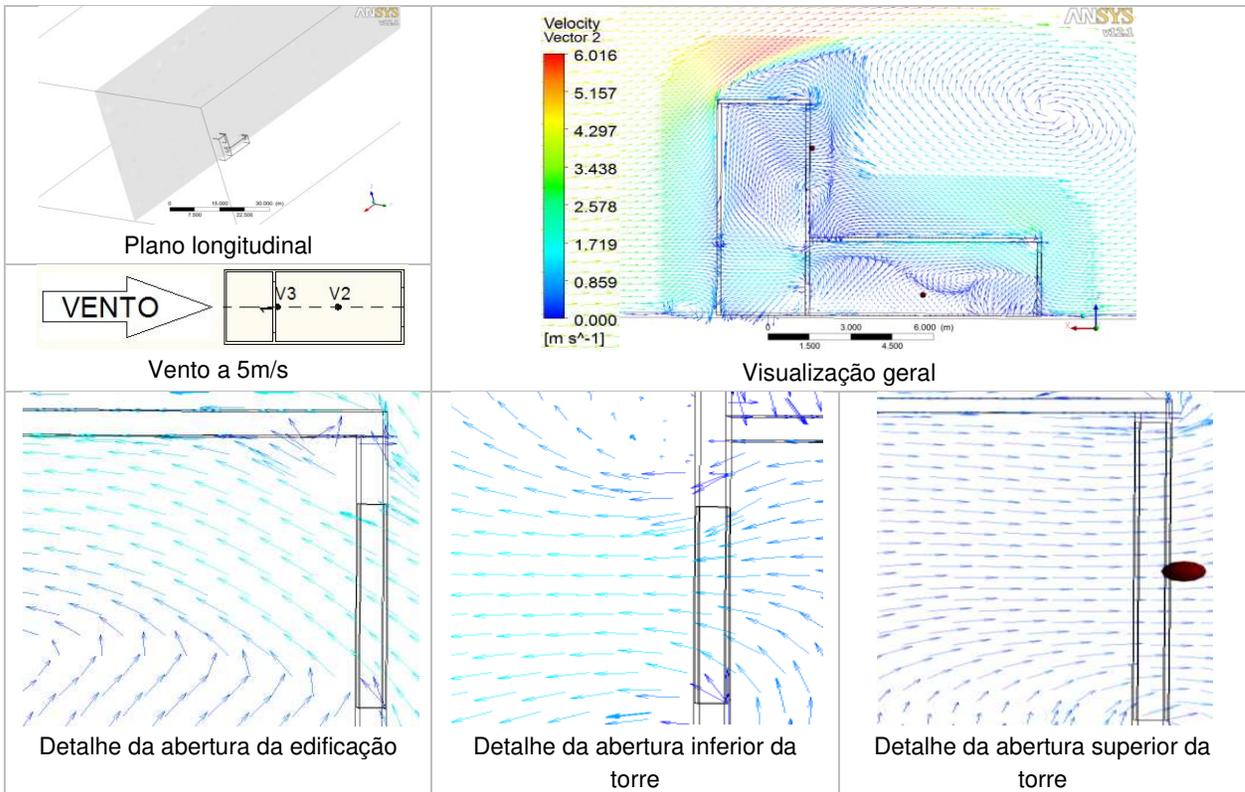
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX[®]

Figura 4.10 a, b, c: Vetores de velocidade do vento para a torre unidirecional a 90°

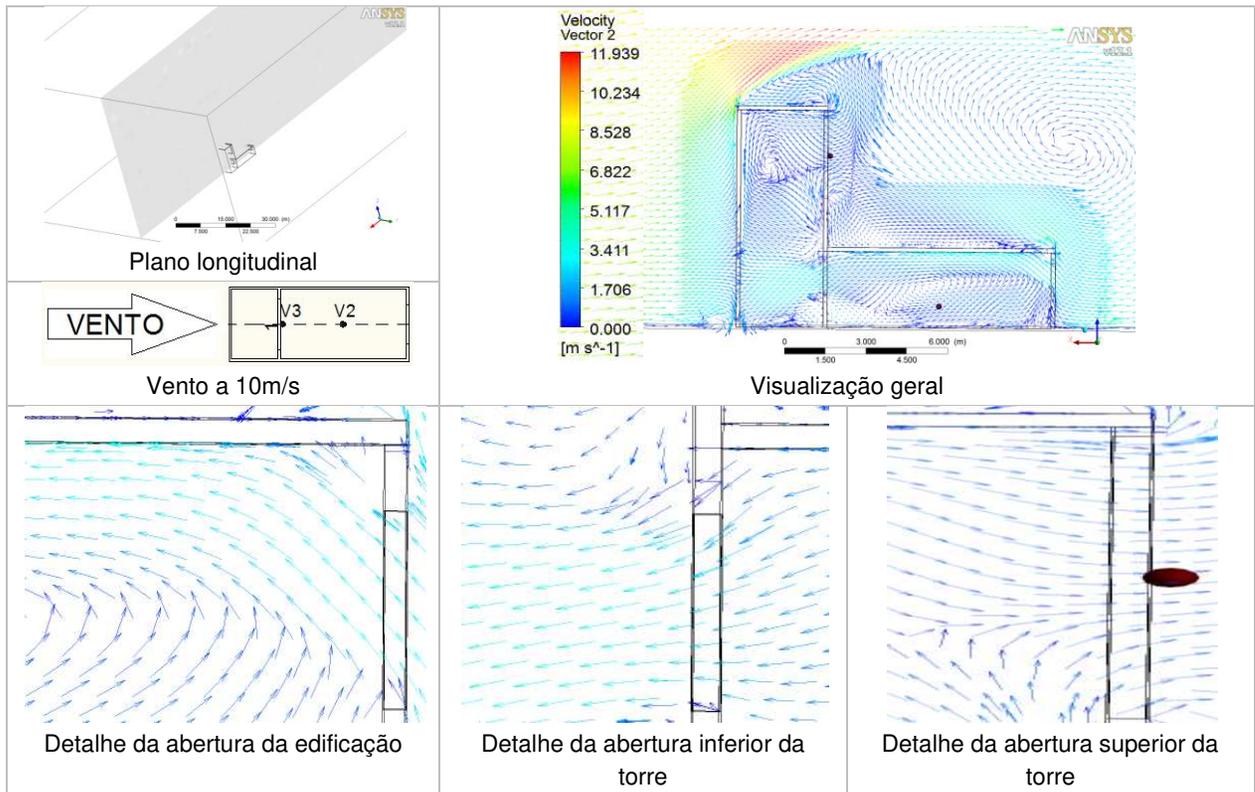
a)



b)



c)



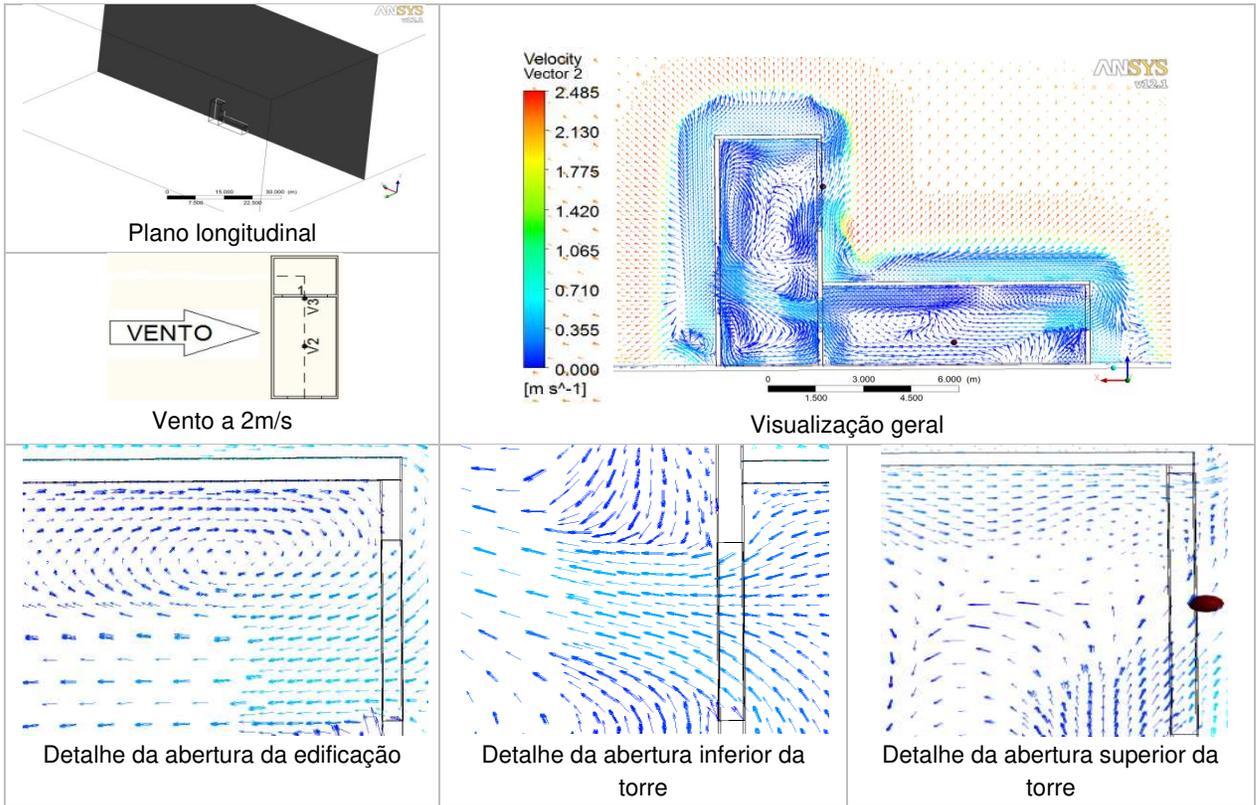
V2 e V3: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1: posição da abertura da torre

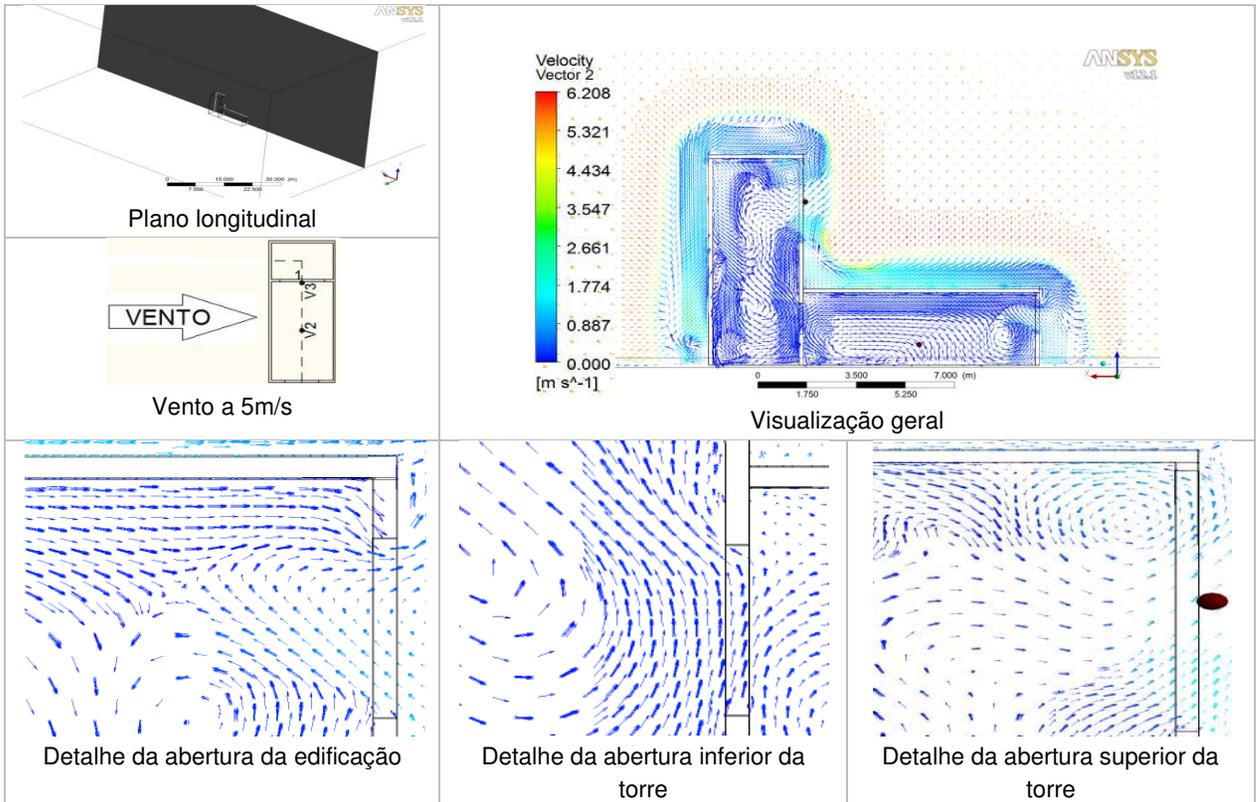
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.11 a, b, c: Vetores de velocidade do vento para a torre unidirecional a 180°

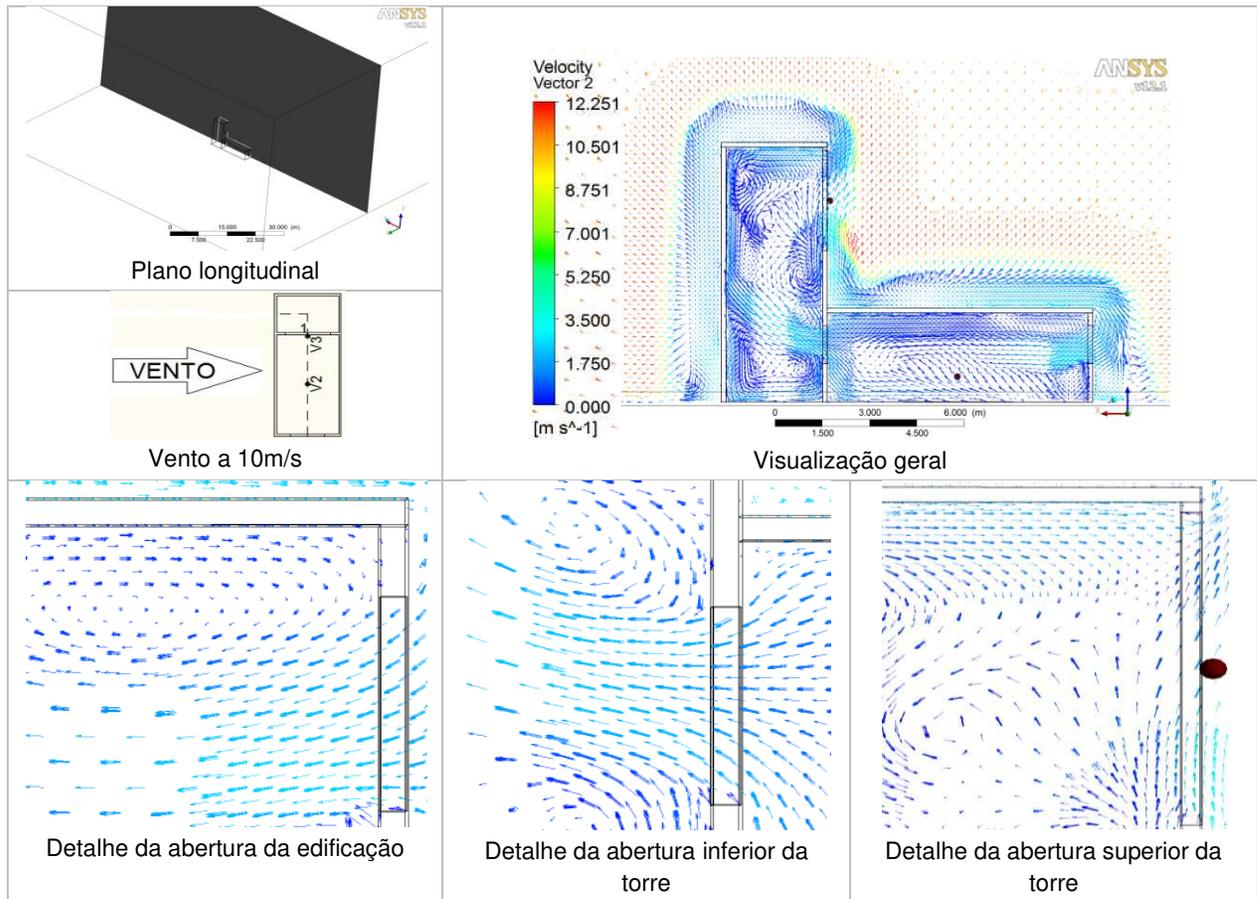
a)



b)



c)



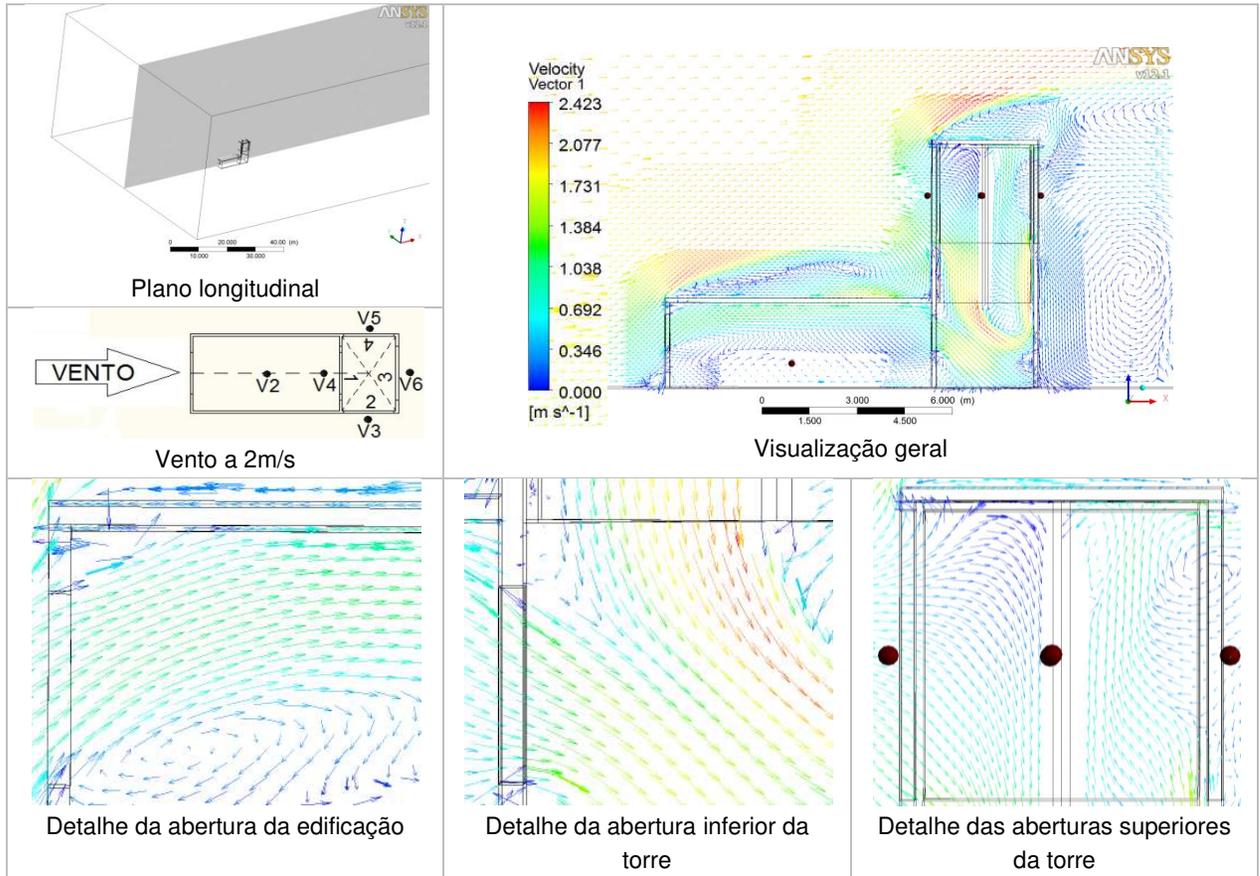
V2 e V3: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1: posição da abertura da torre

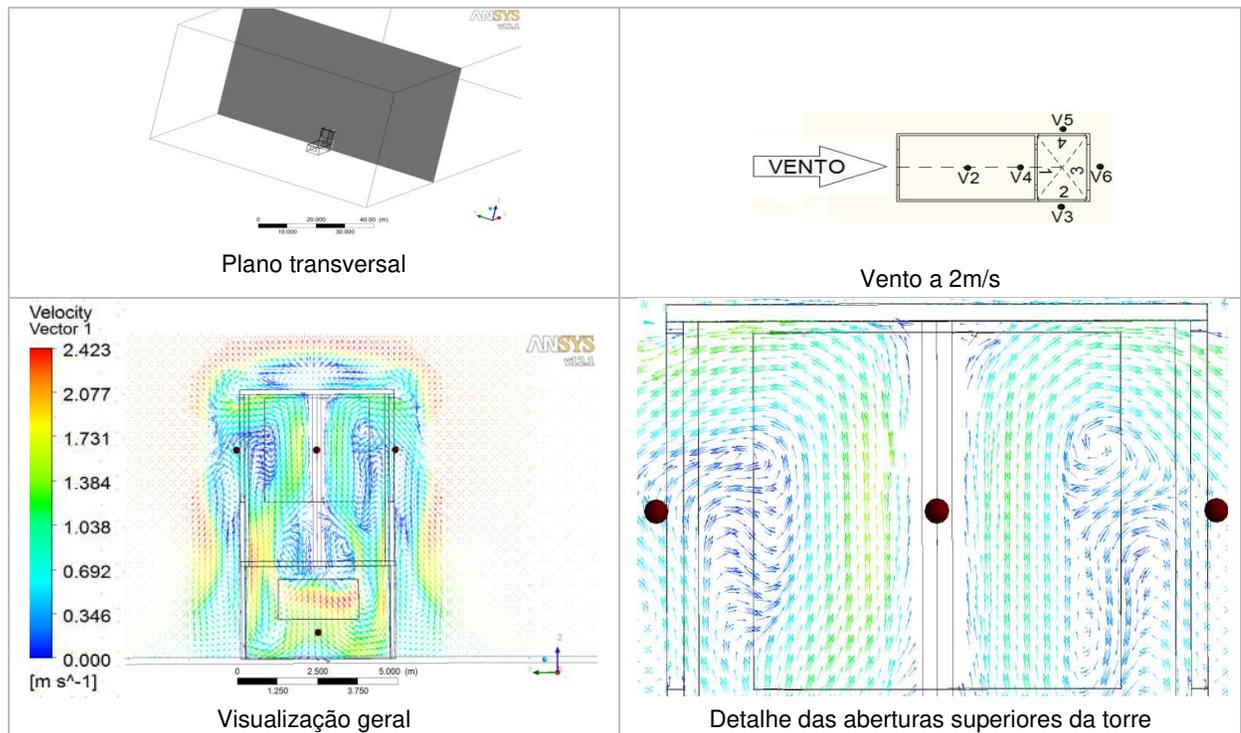
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.12 a, b, c: Vetores de velocidade do vento para a torre unidirecional a 270°

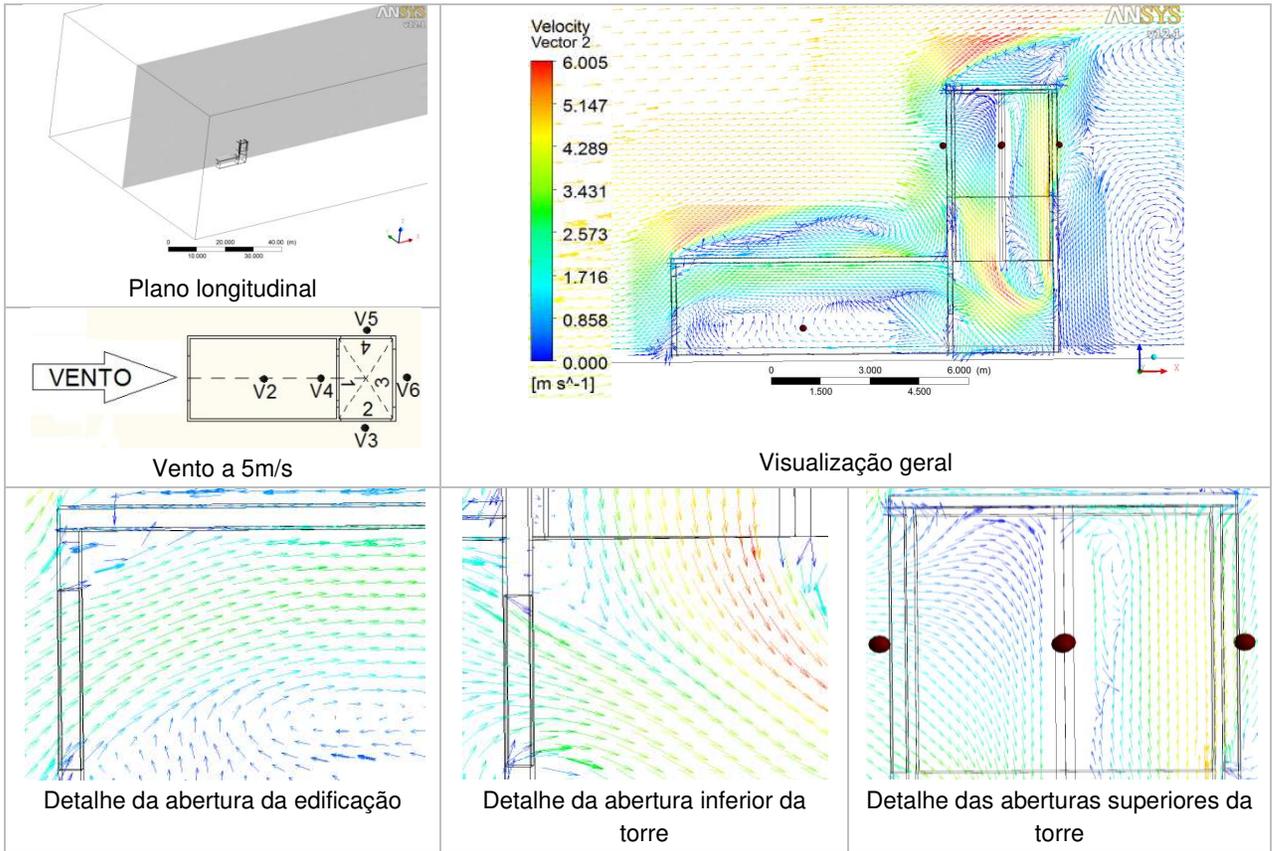
a)



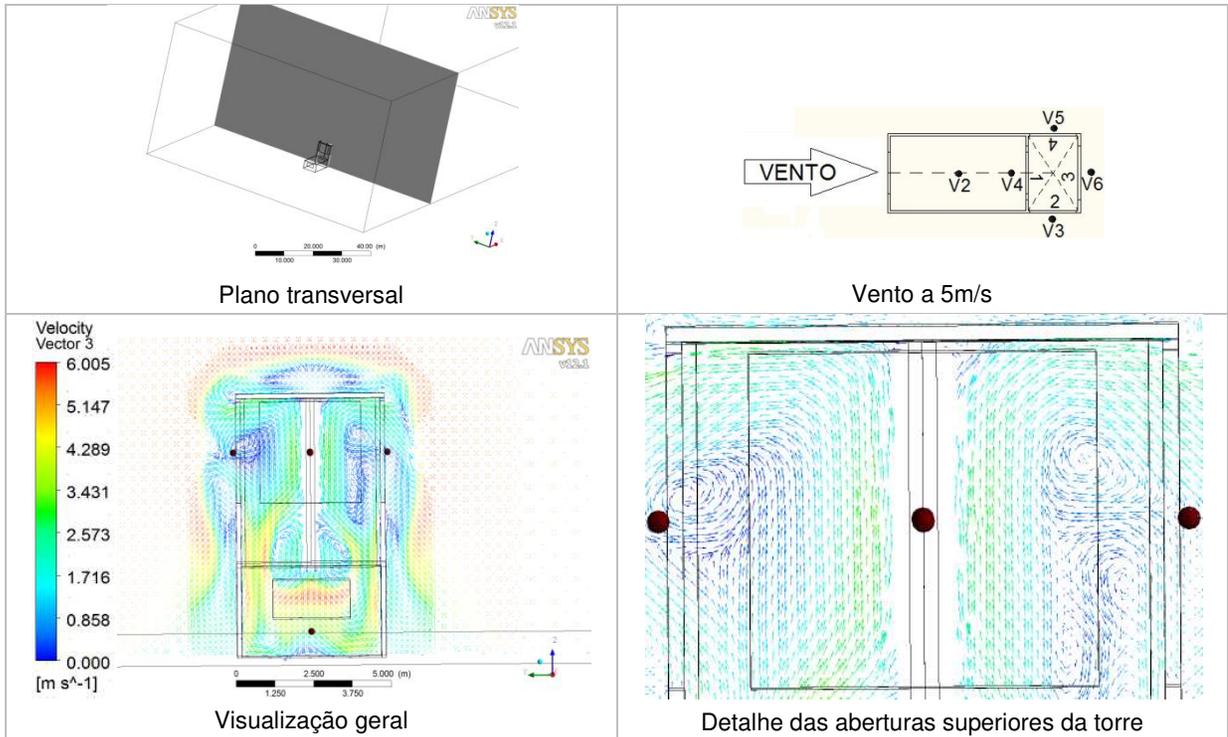
b)



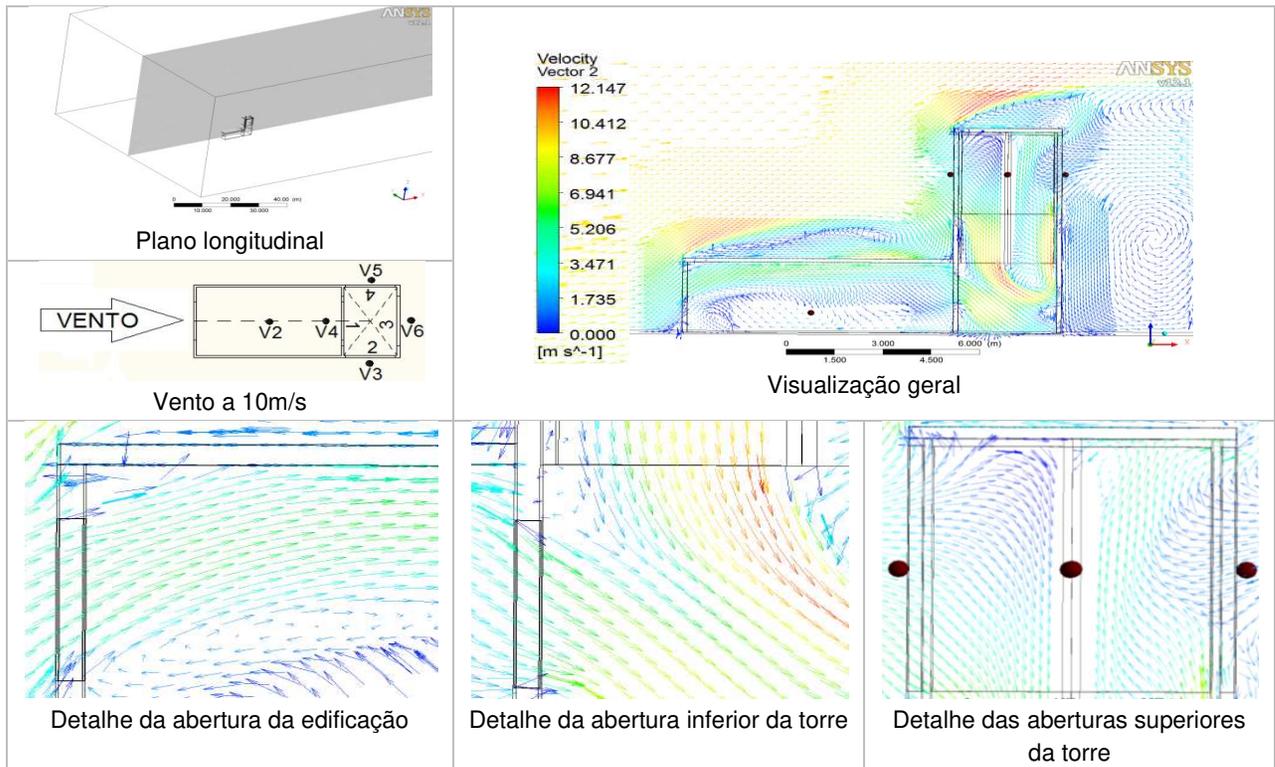
c)



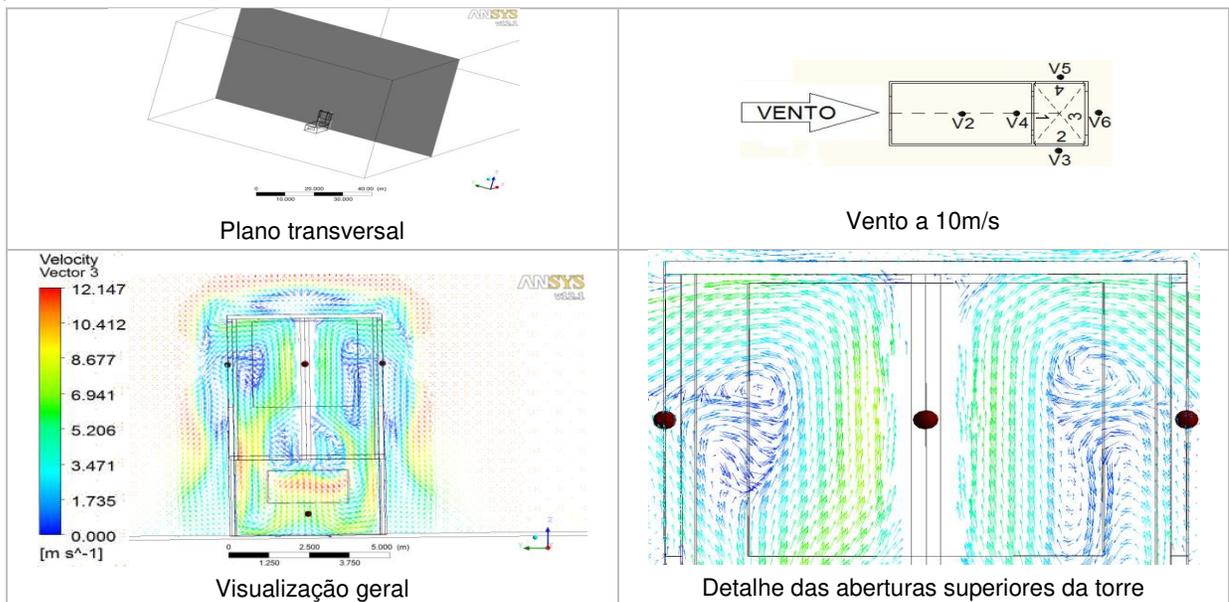
d)



e)



f)

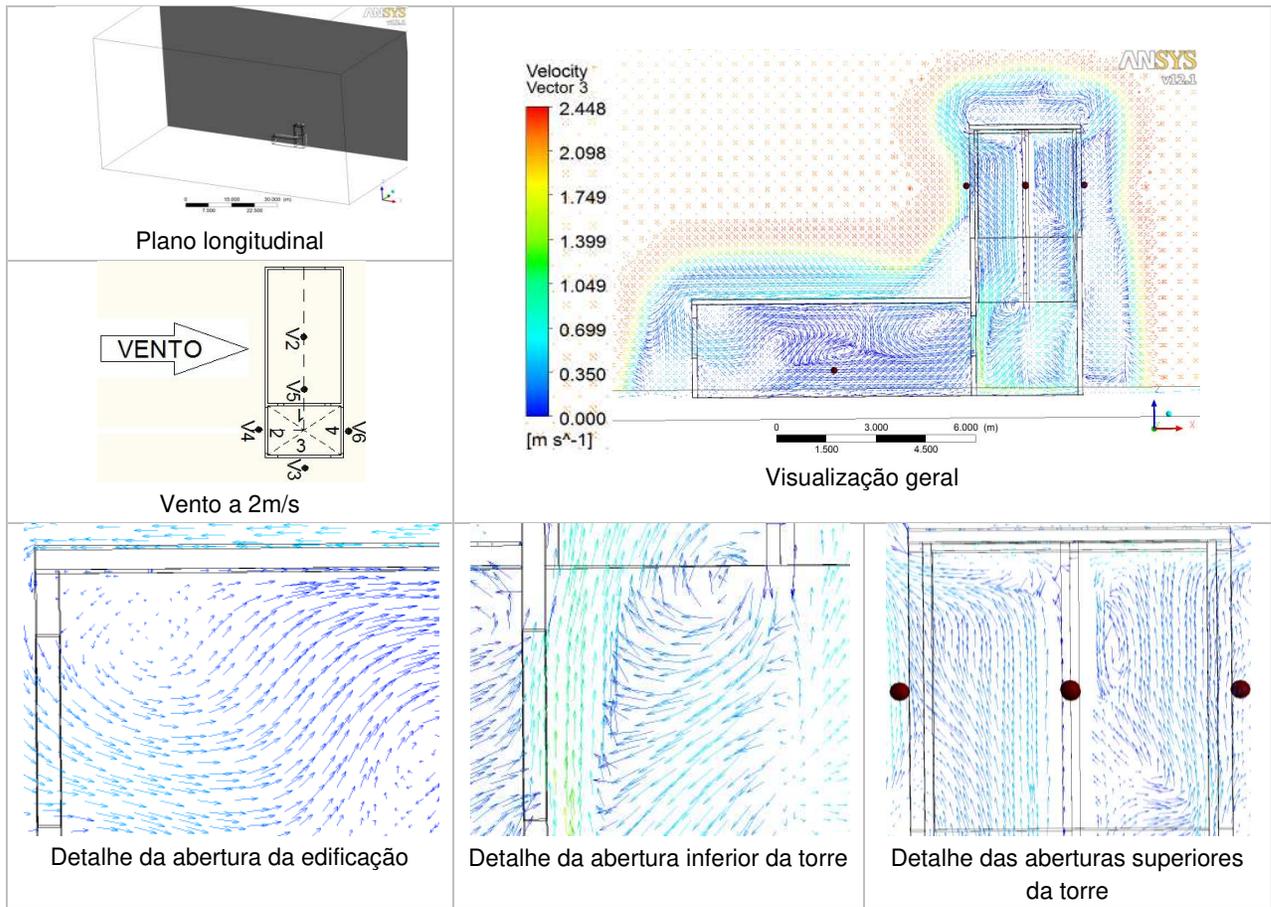


V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento
 1 a 4: posições das aberturas da torre

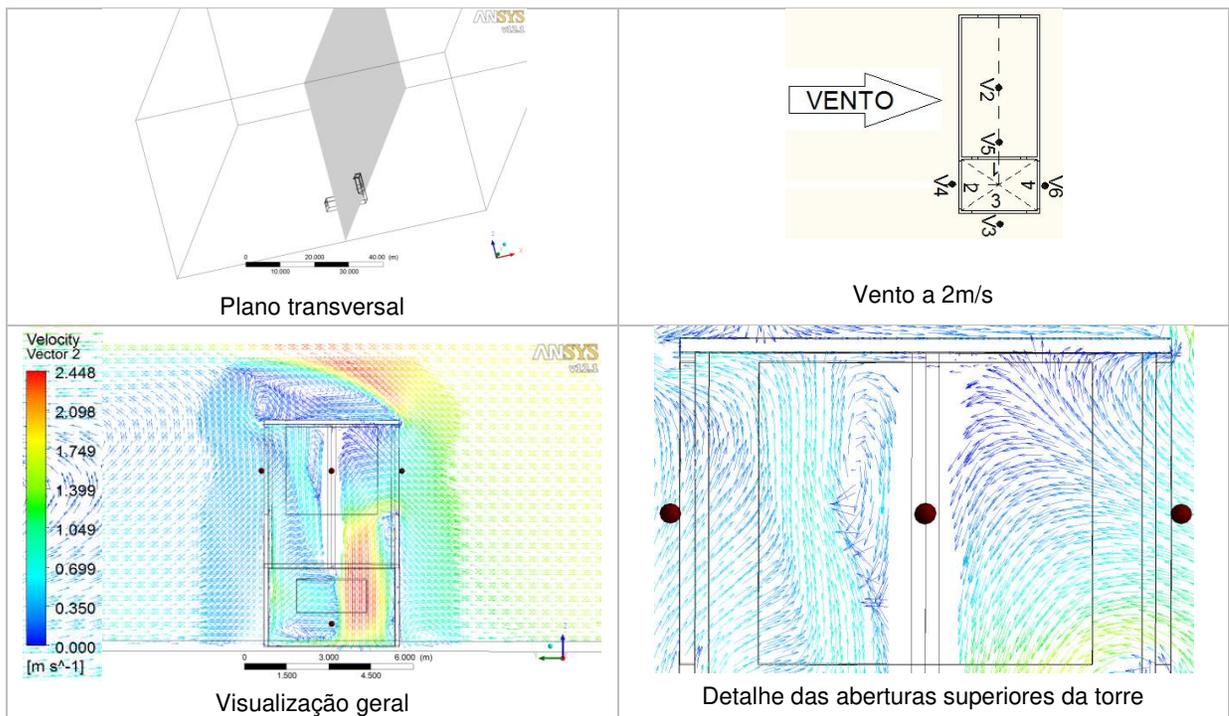
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.13 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre tetradirecional a 0°

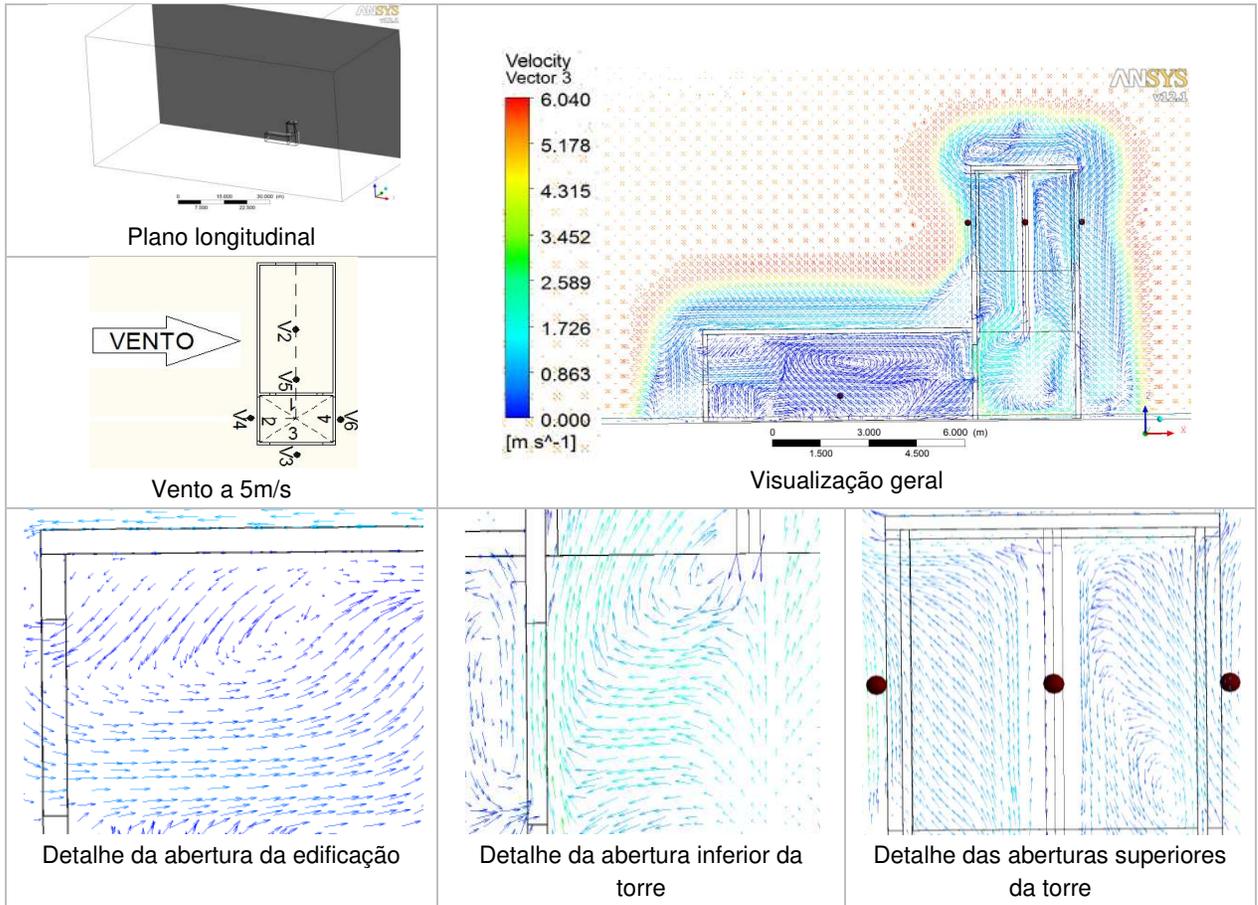
a)



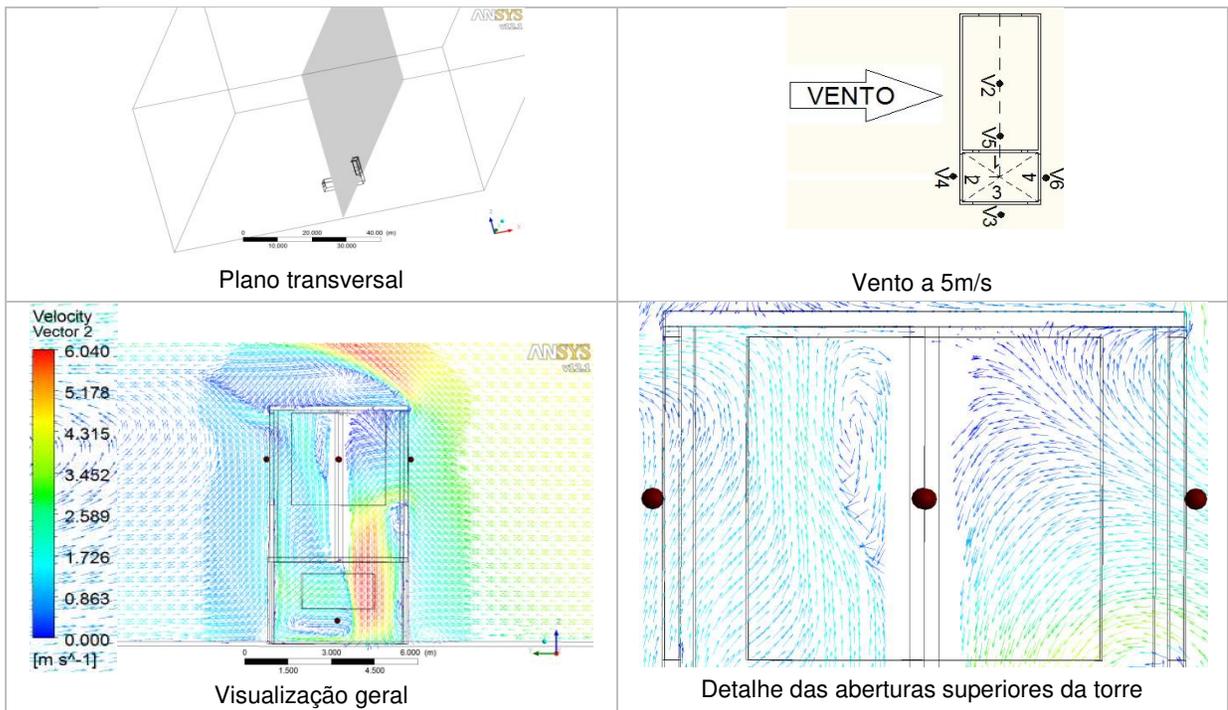
b)



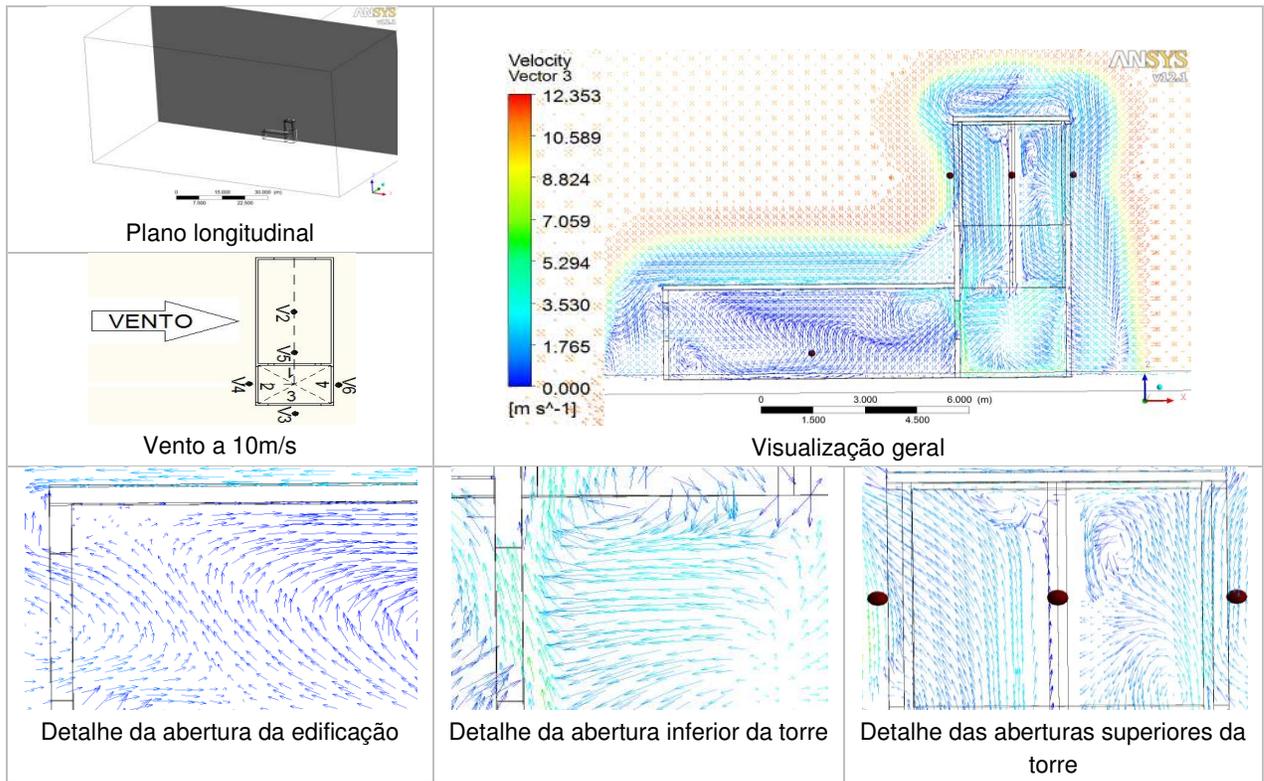
c)



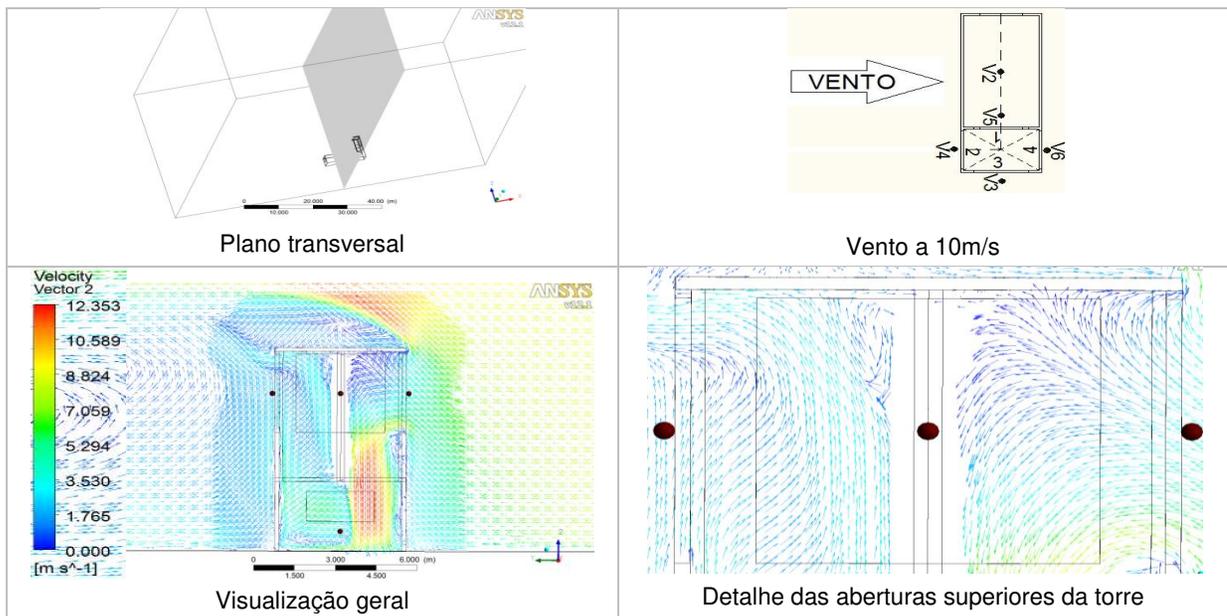
d)



e)



f)



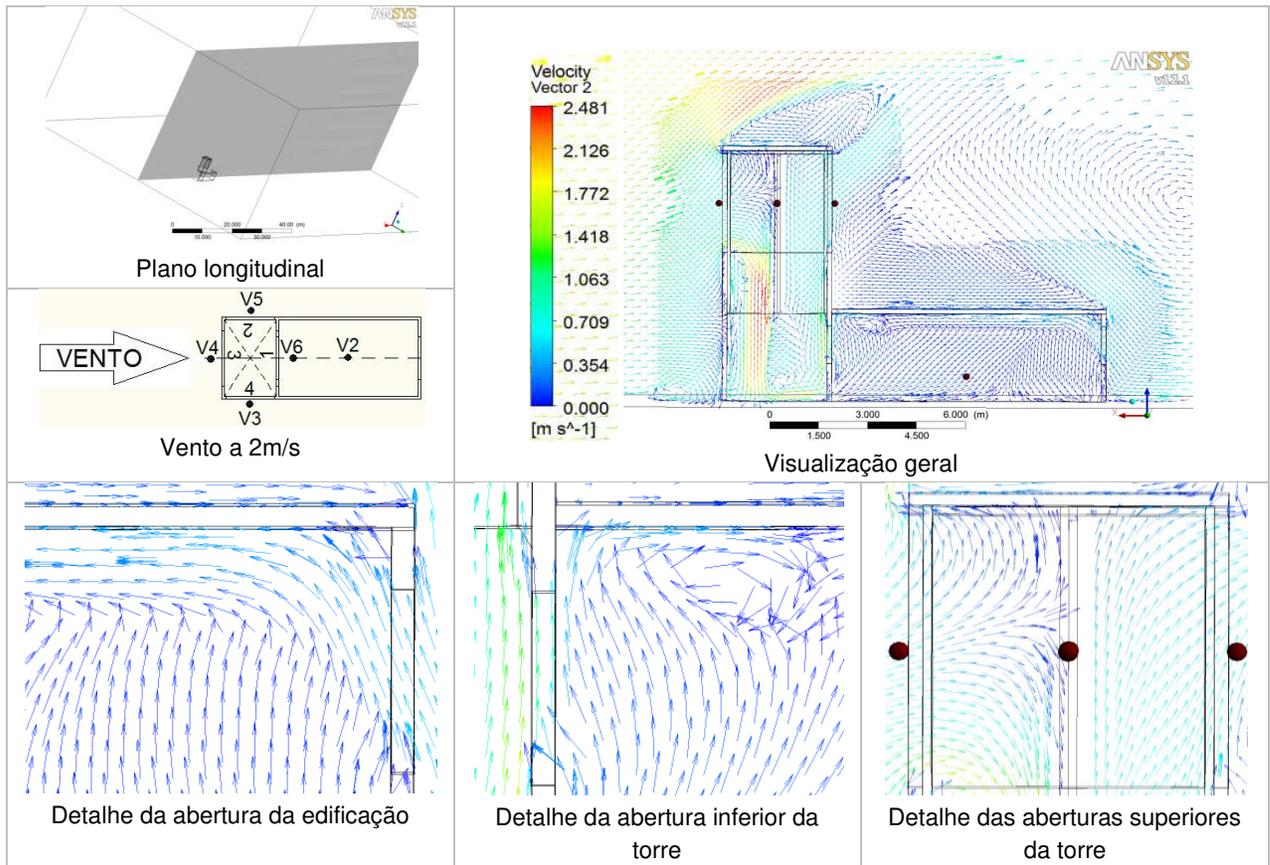
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 4: posições das aberturas da torre

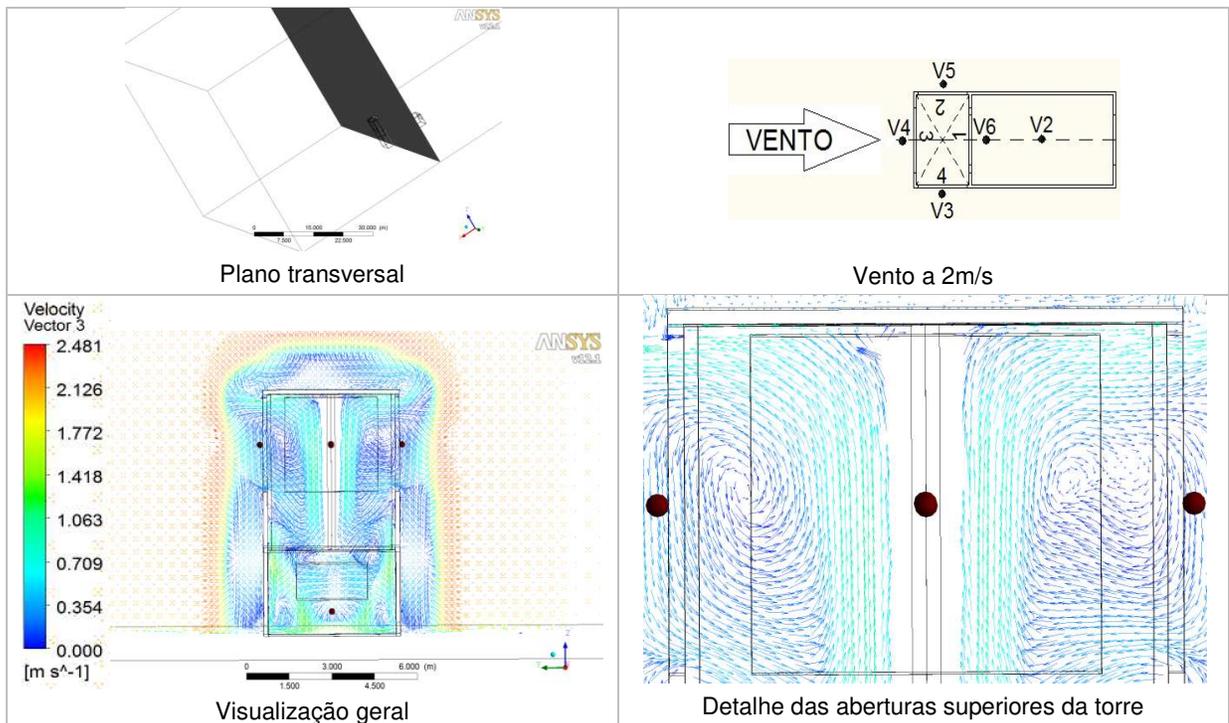
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.14 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre tetradirecional a 90°

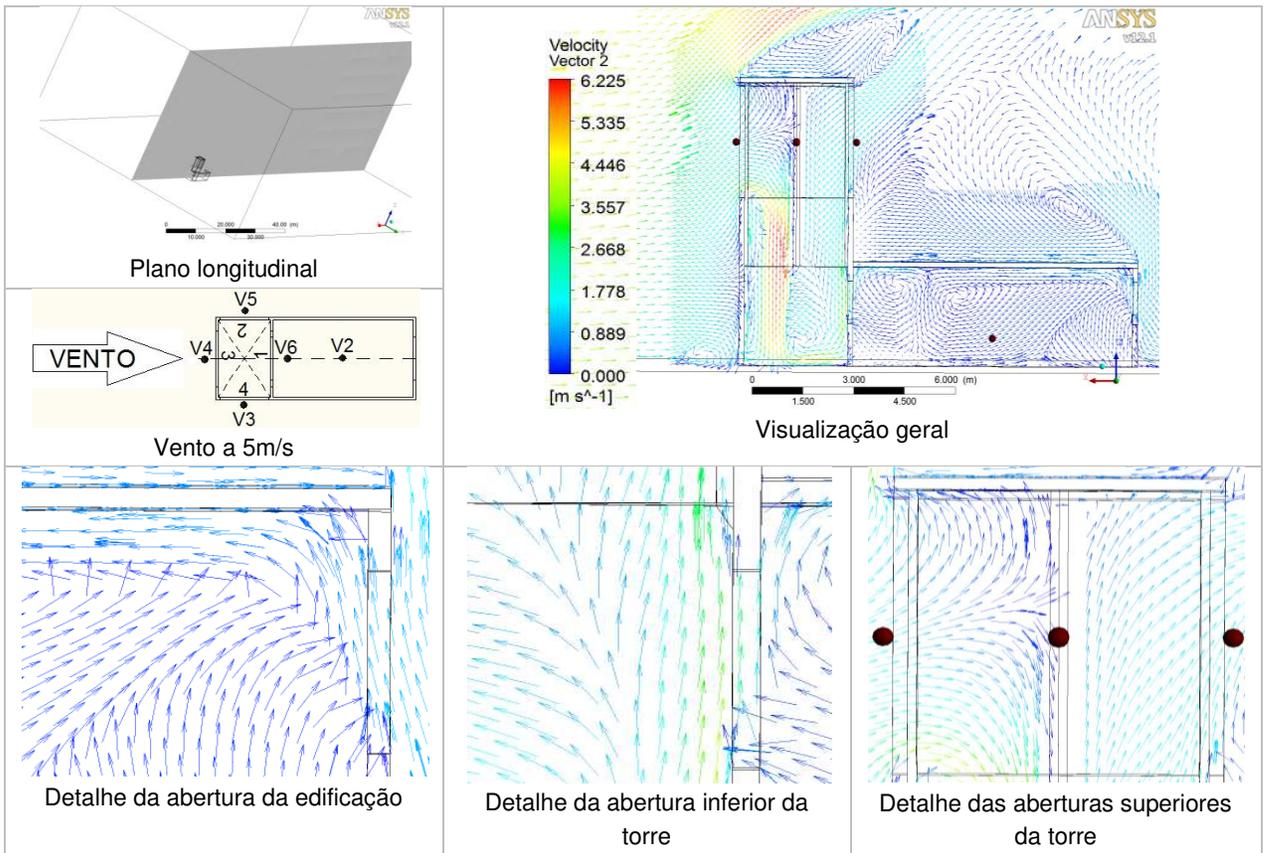
a)



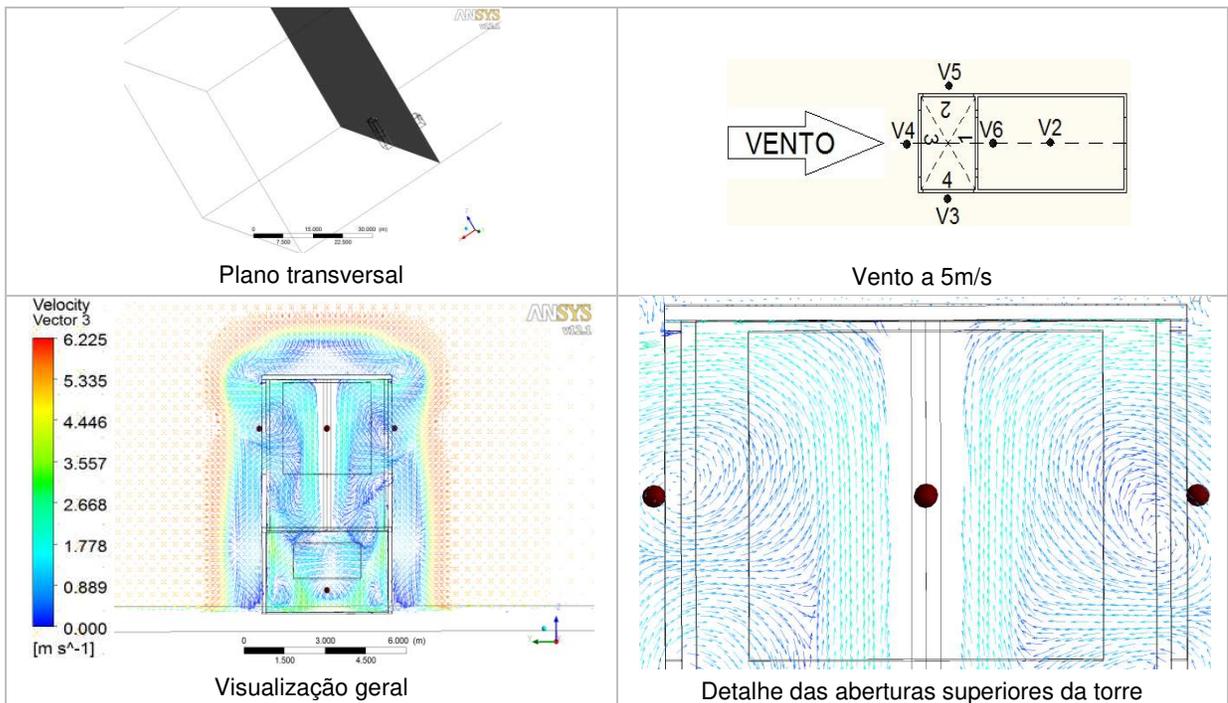
b)



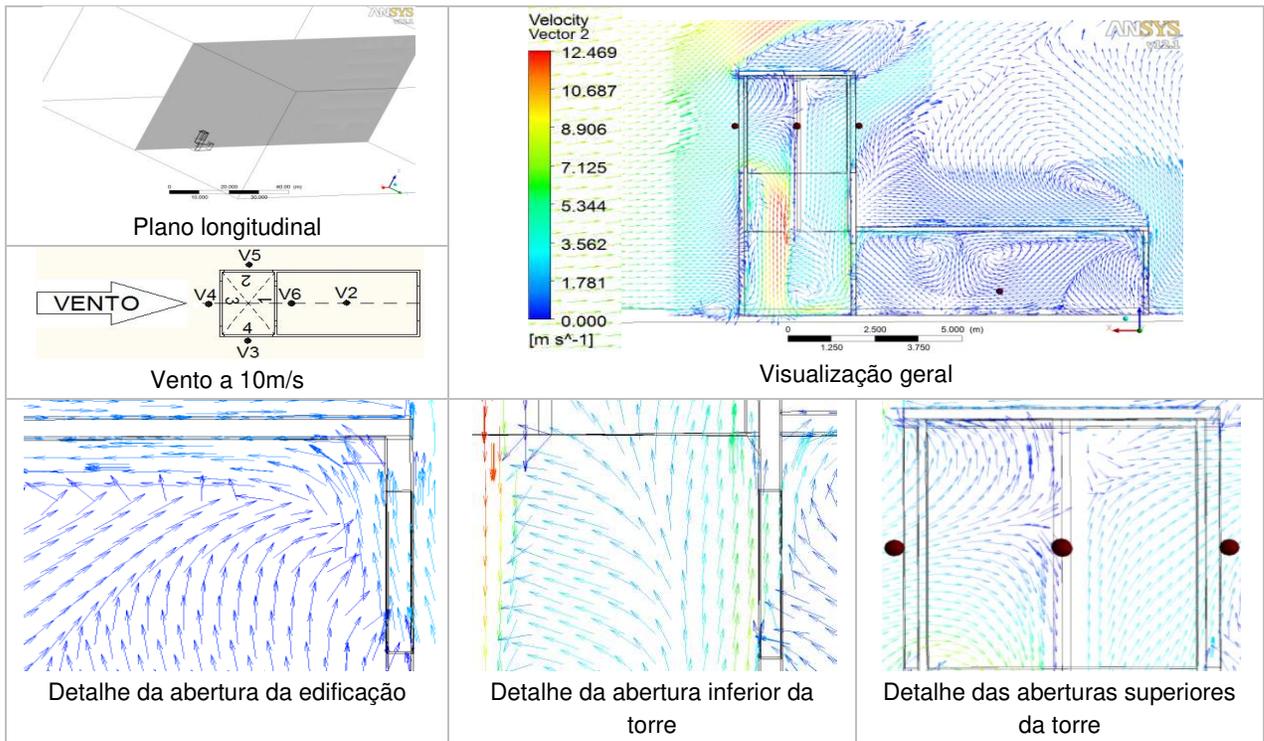
c)



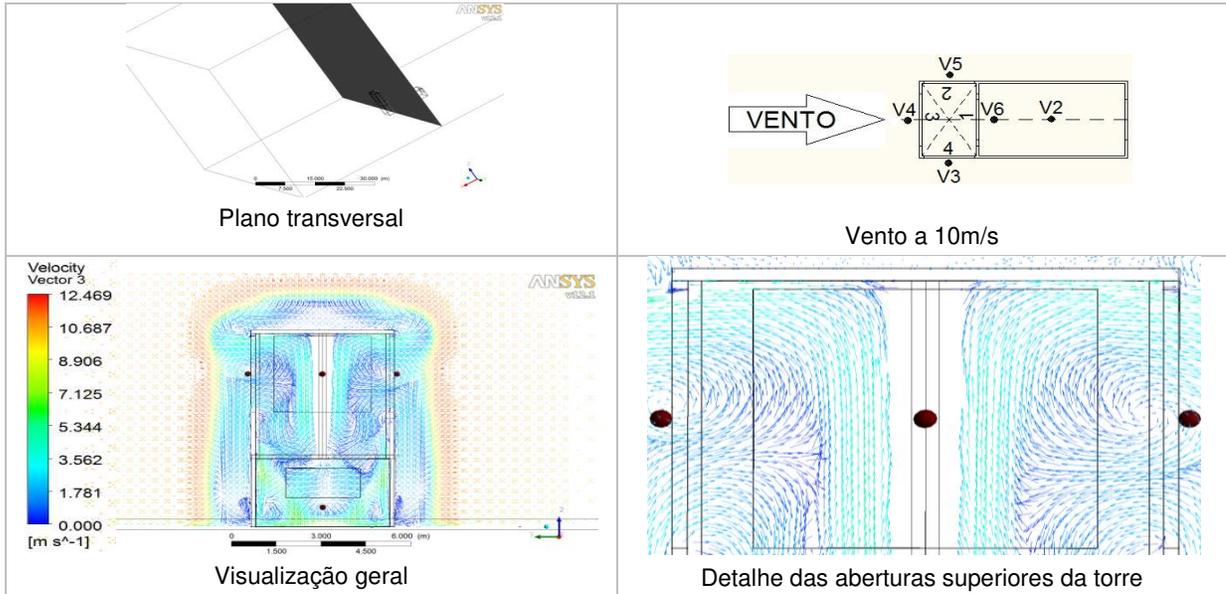
d)



e)



f)



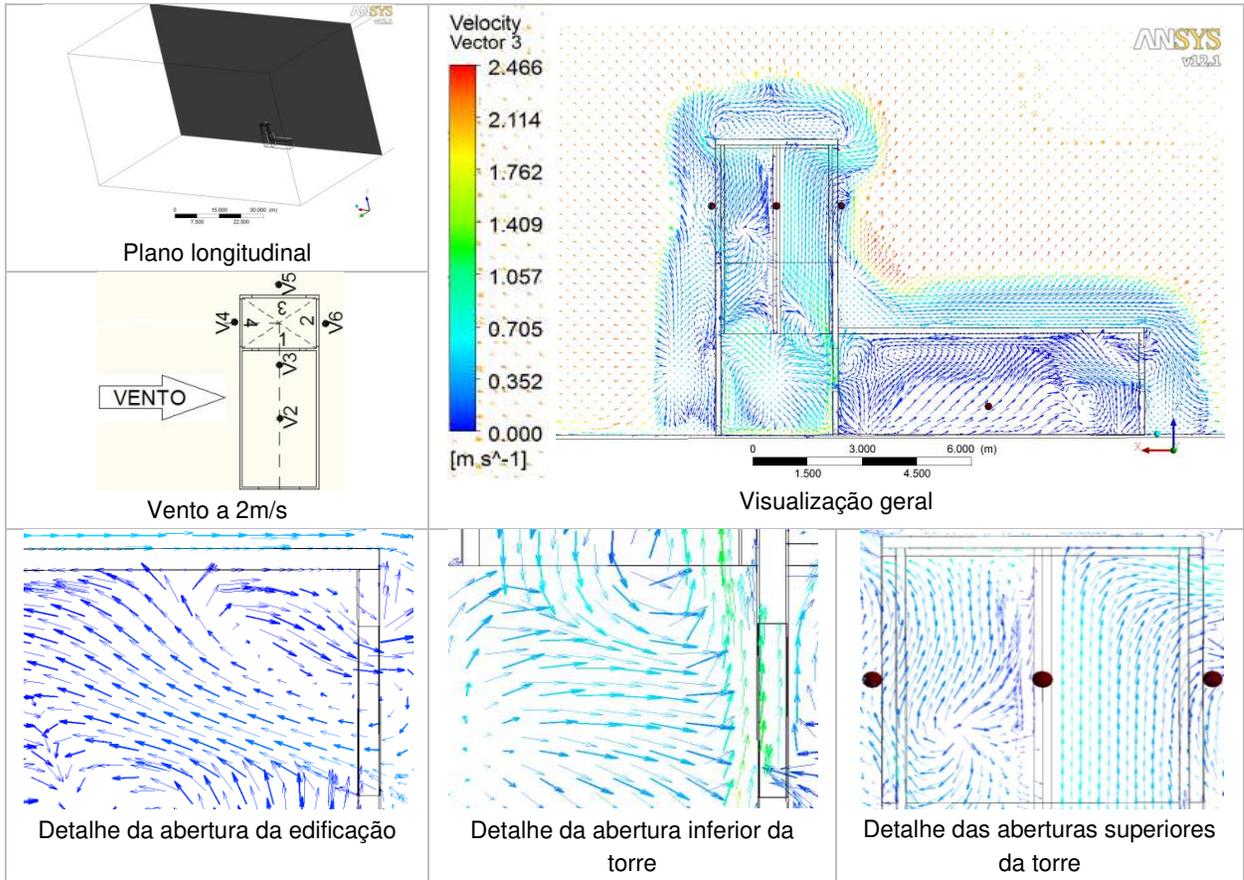
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 4: posições das aberturas da torre

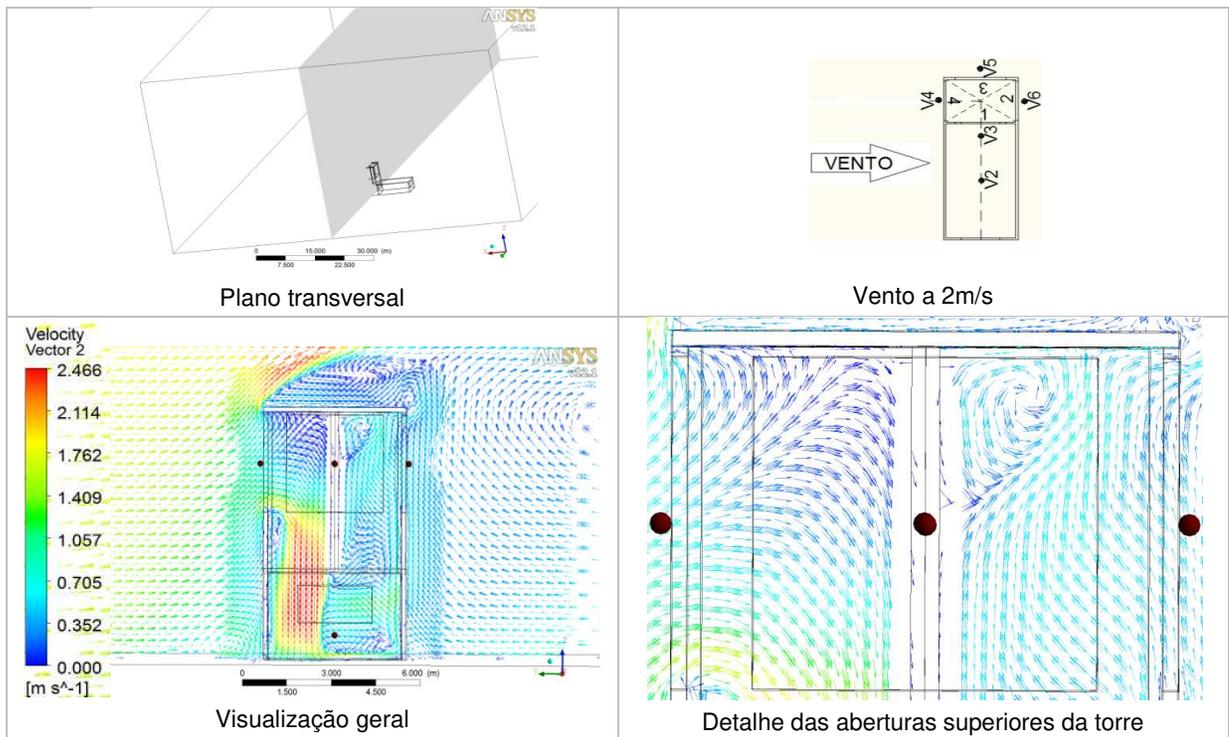
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.15 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre tetradirecional a 180°

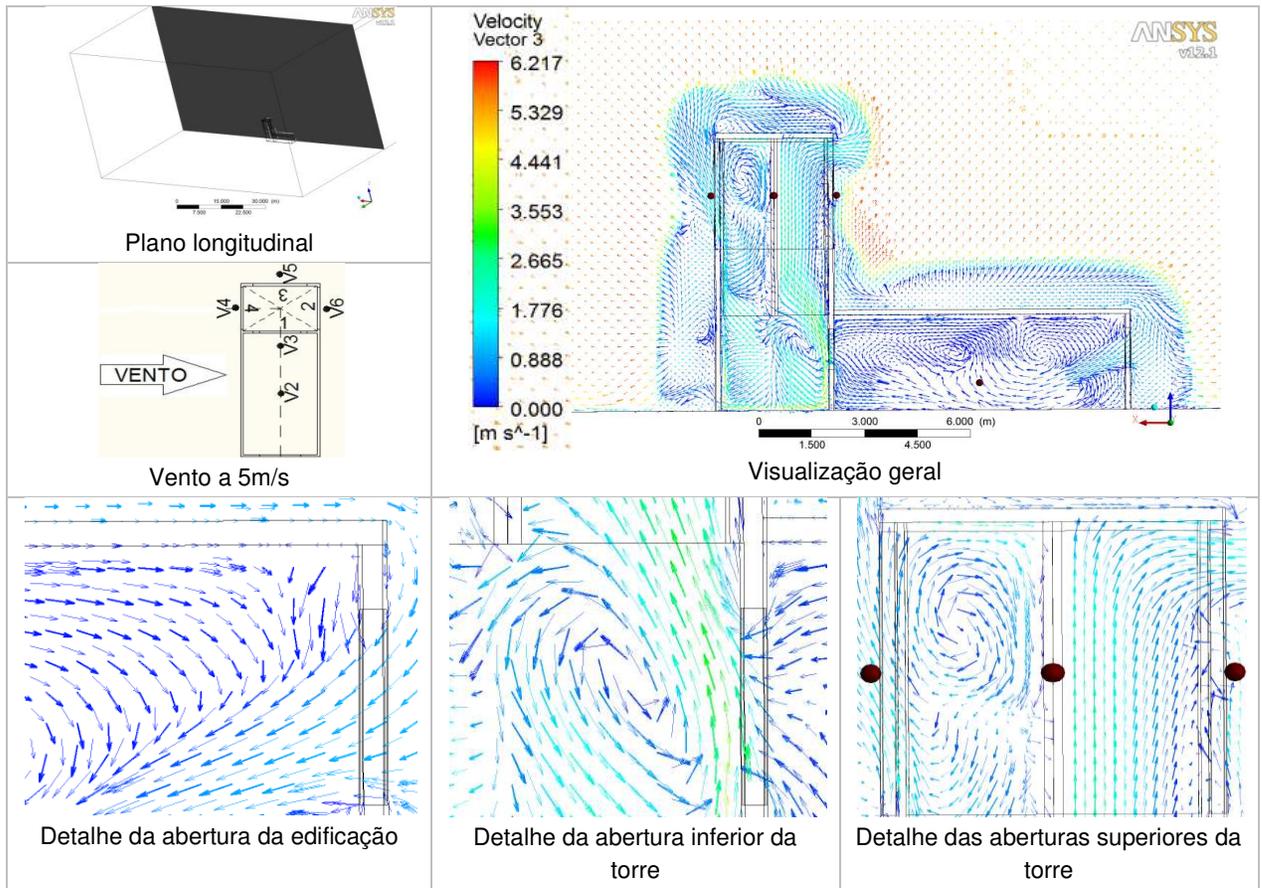
a)



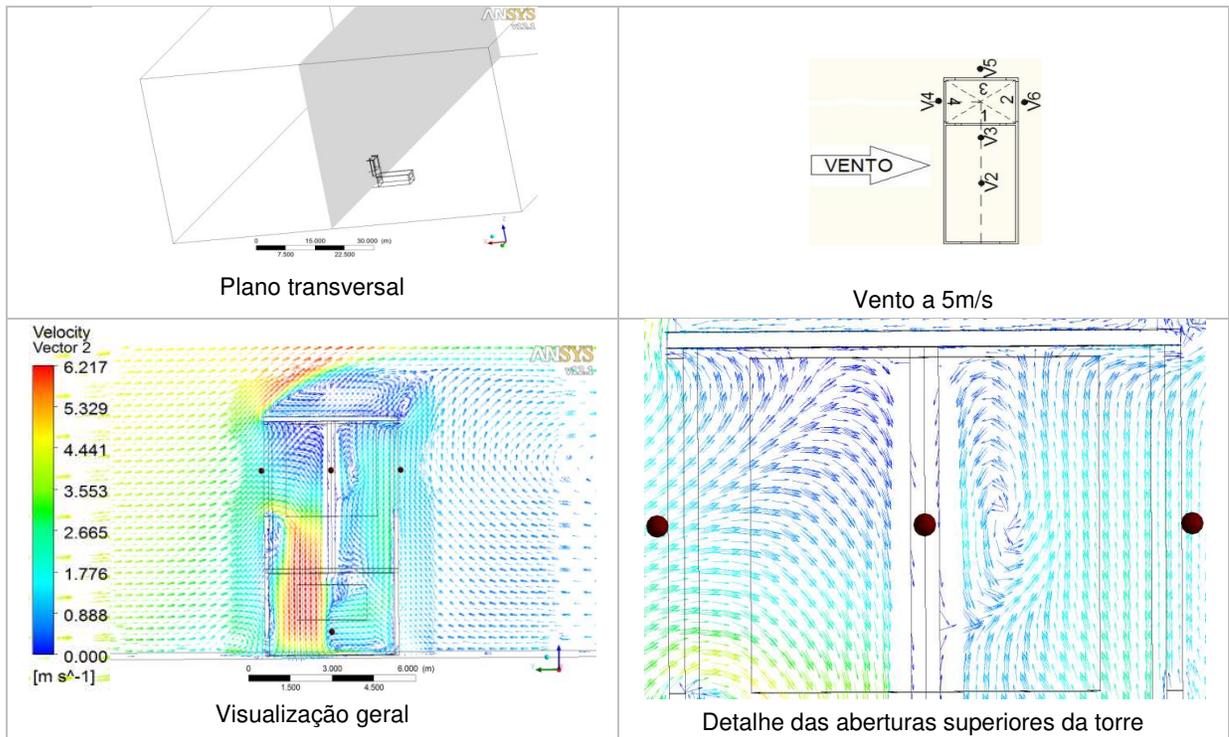
b)



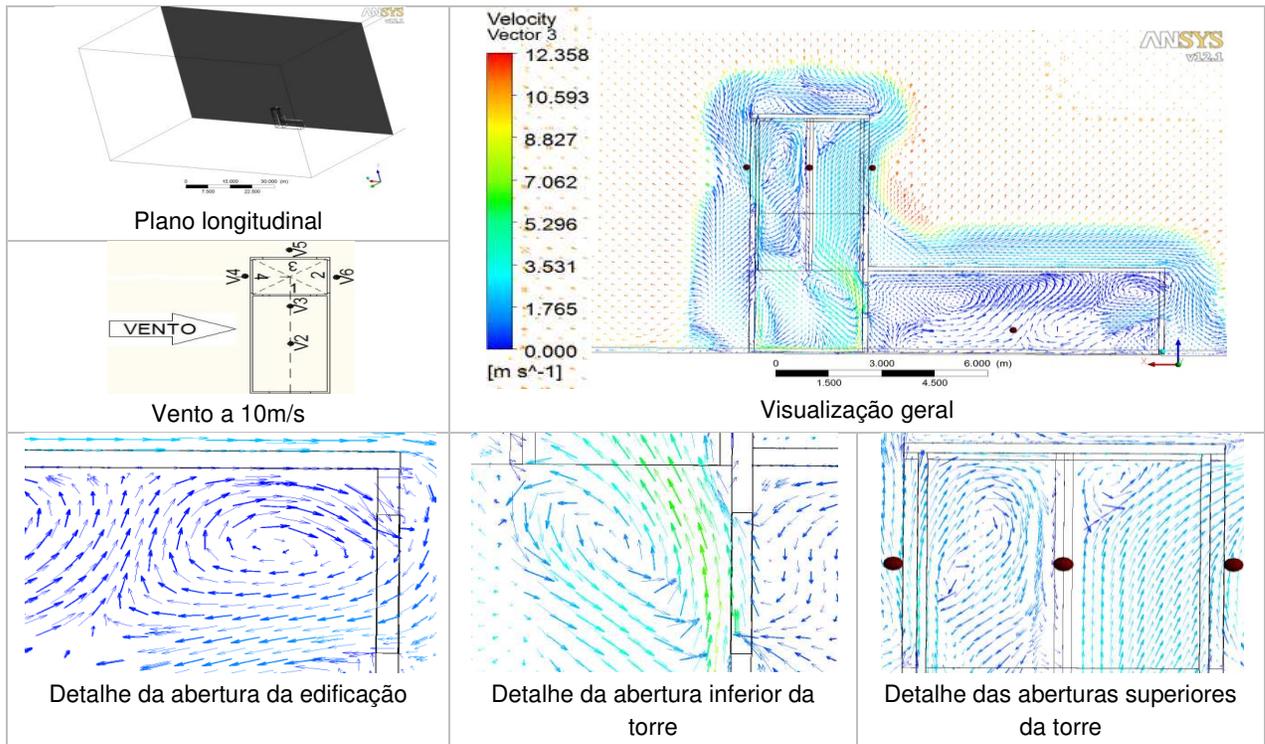
c)



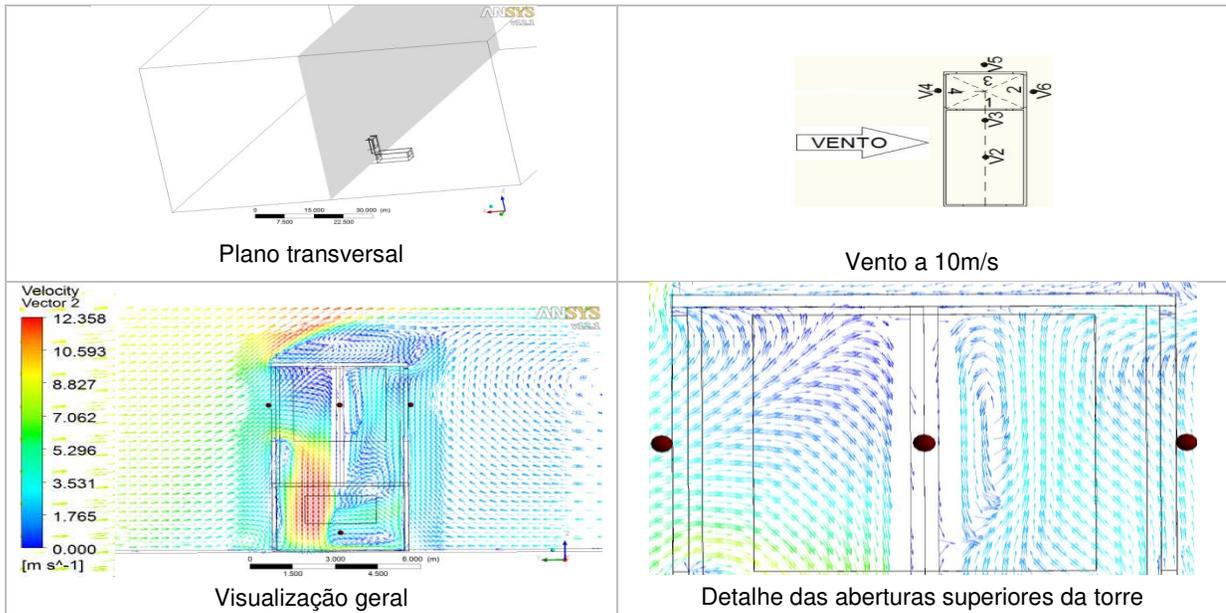
d)



e)



f)



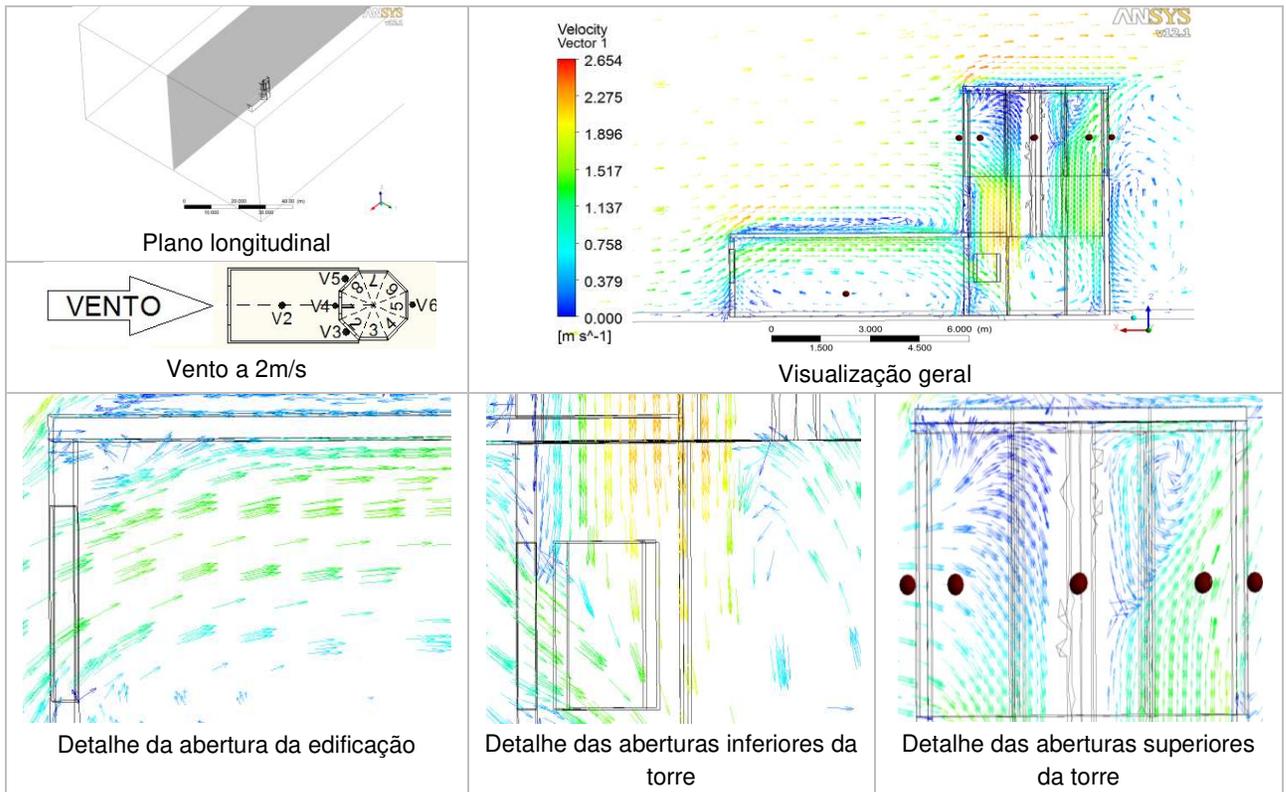
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 4: posições das aberturas da torre

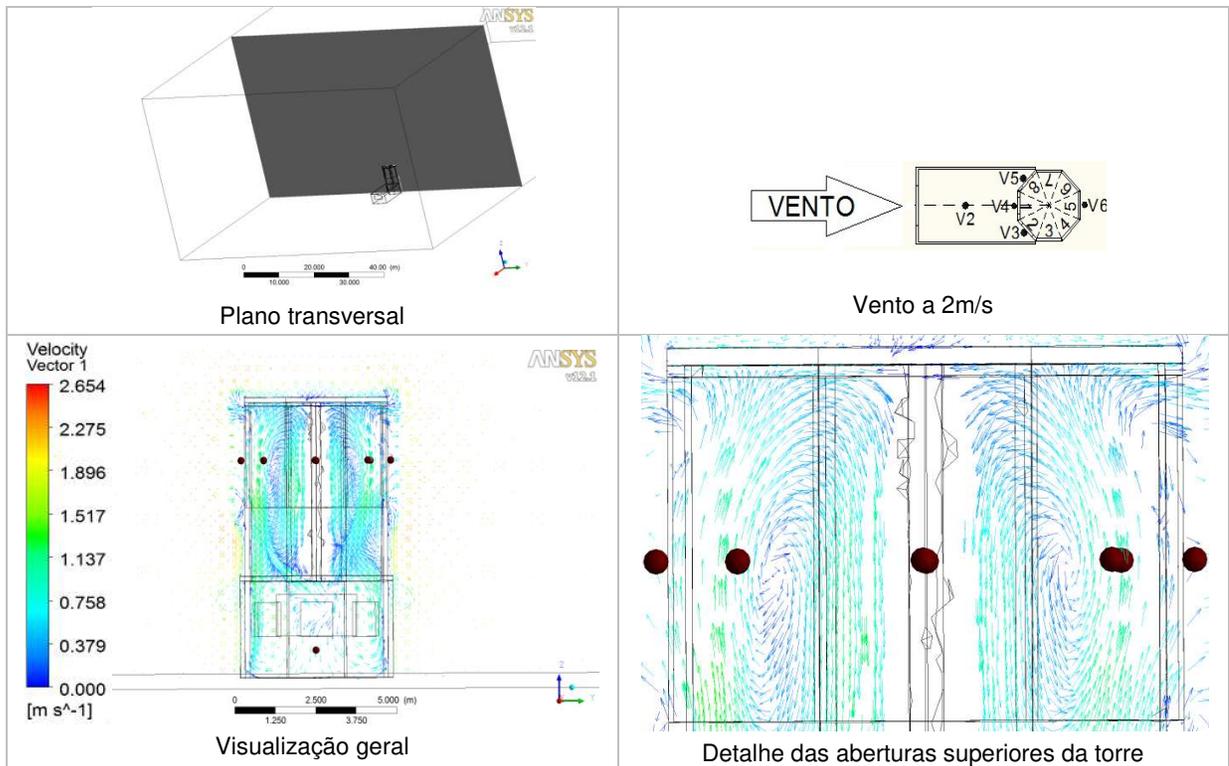
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.16 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre tetradirecional a 270°

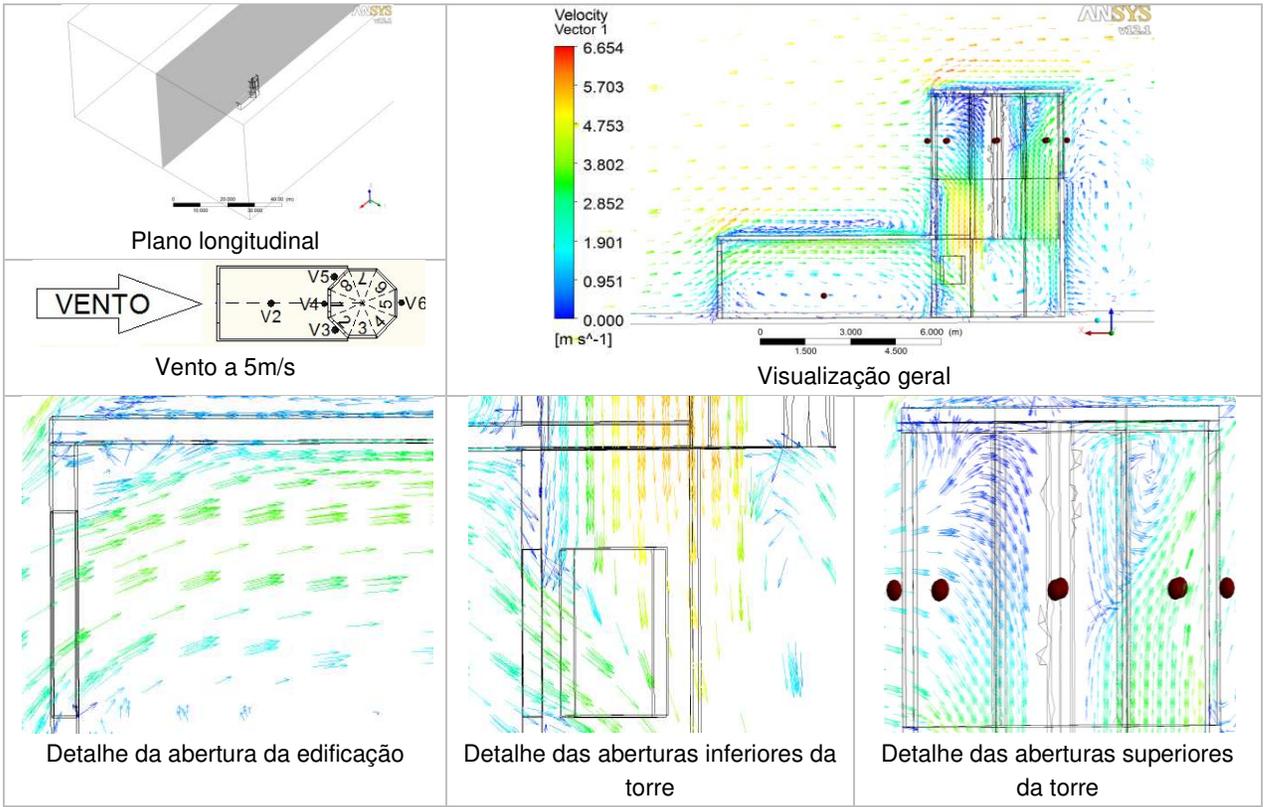
a)



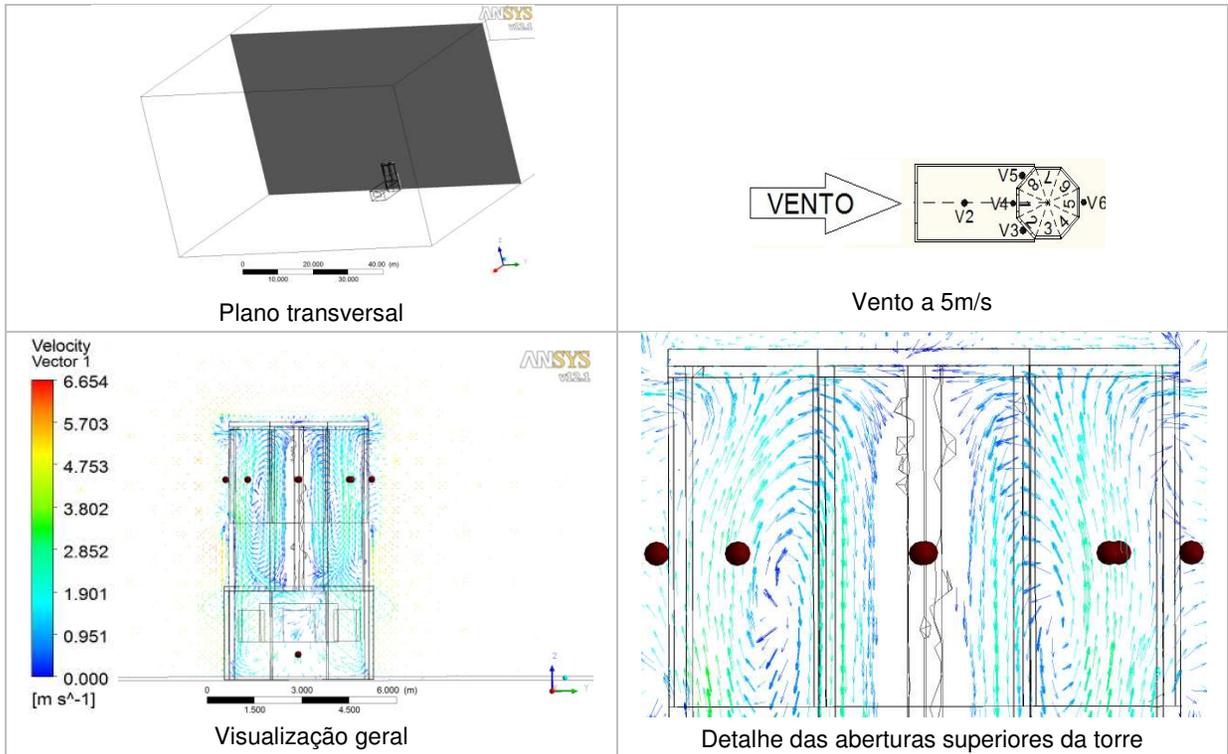
b)



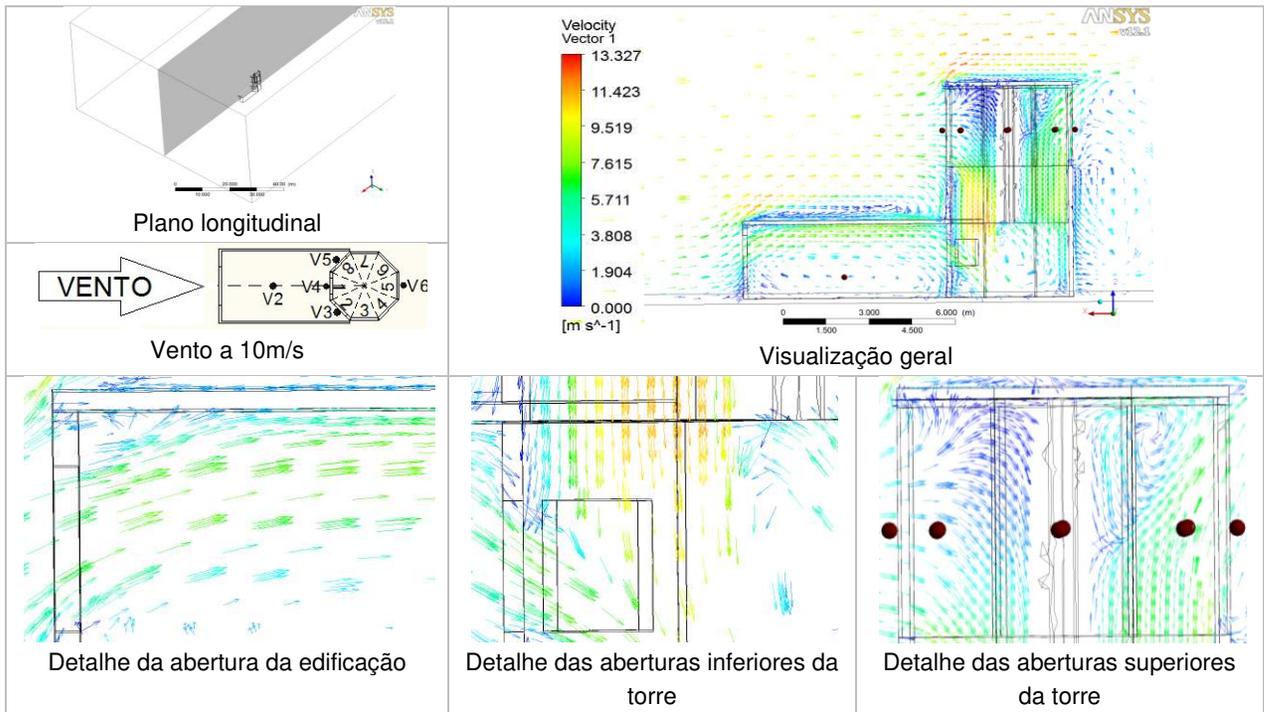
c)



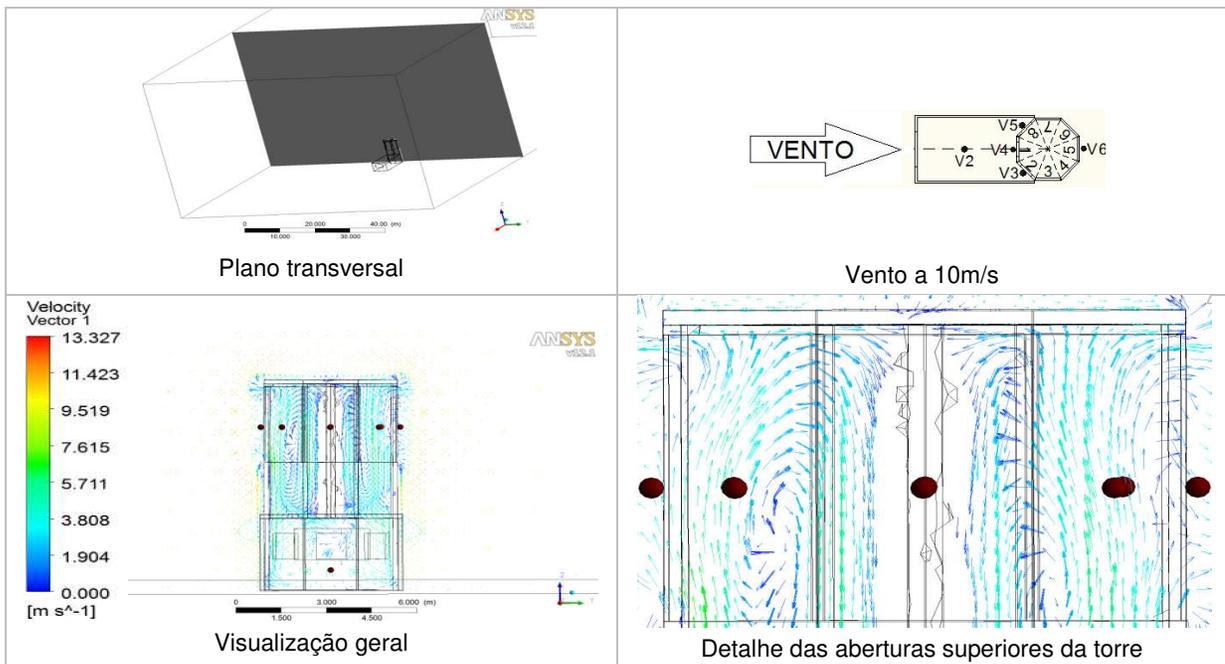
d)



e)



f)

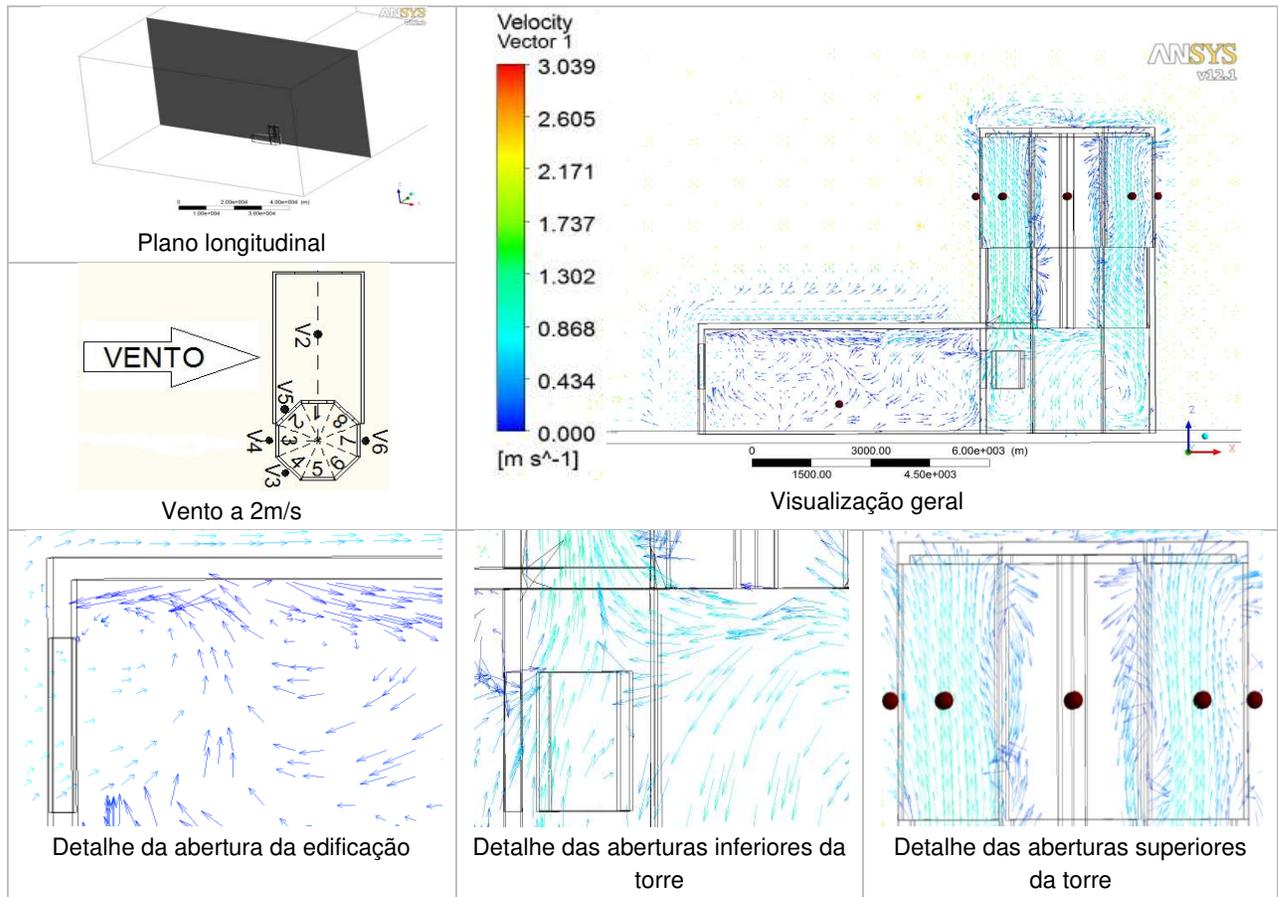


V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento
 1 a 8: posições das aberturas da torre

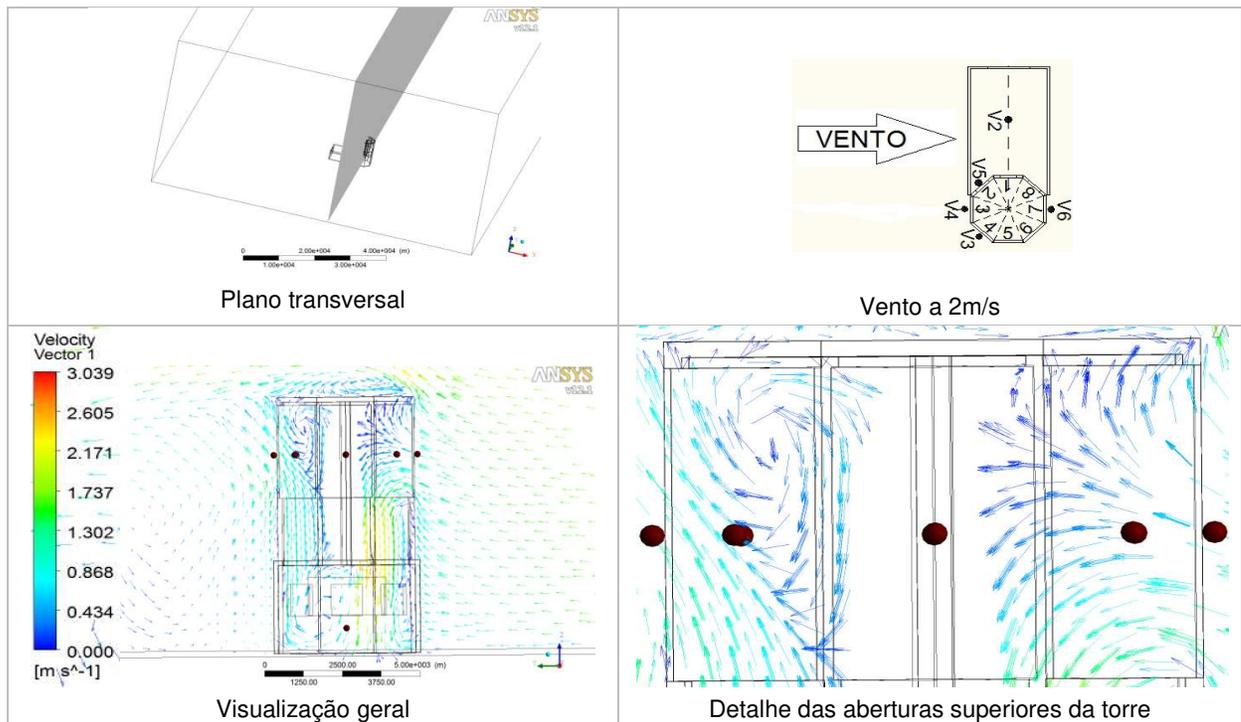
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.17 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre octodirecional a 0°

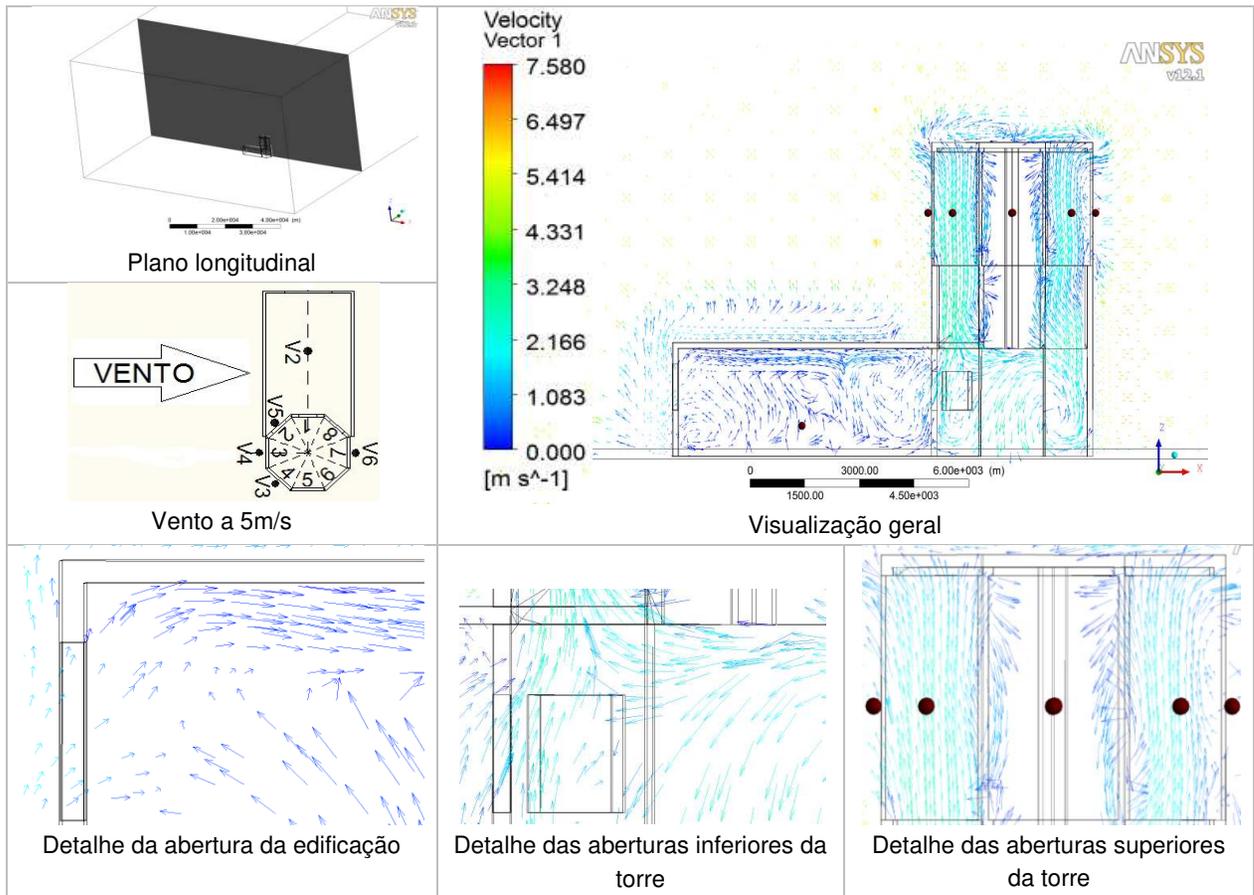
a)



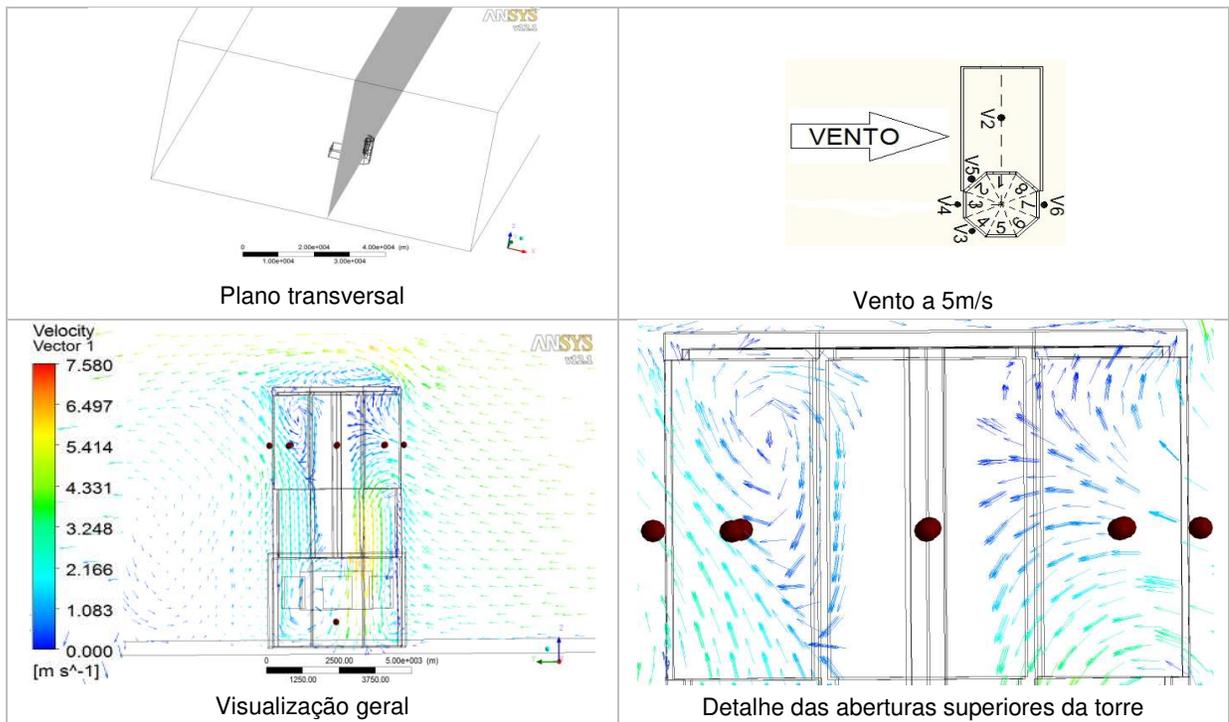
b)



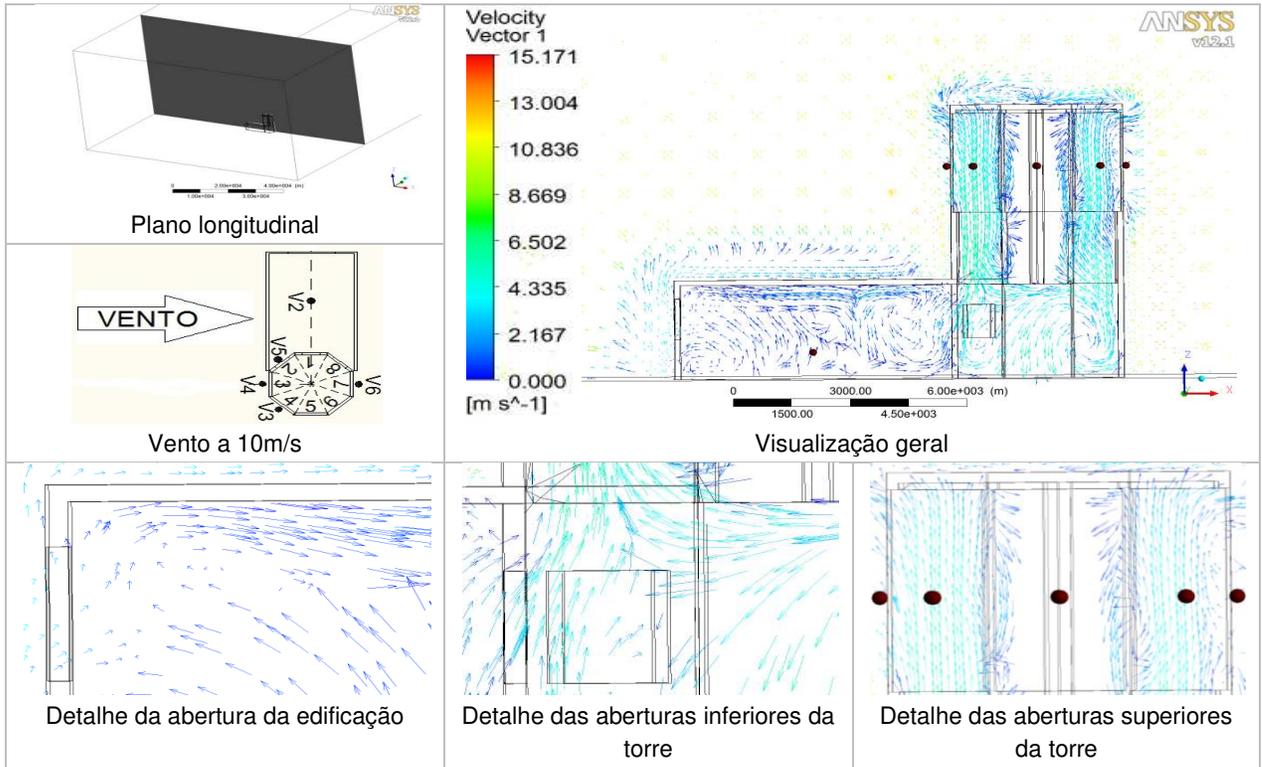
c)



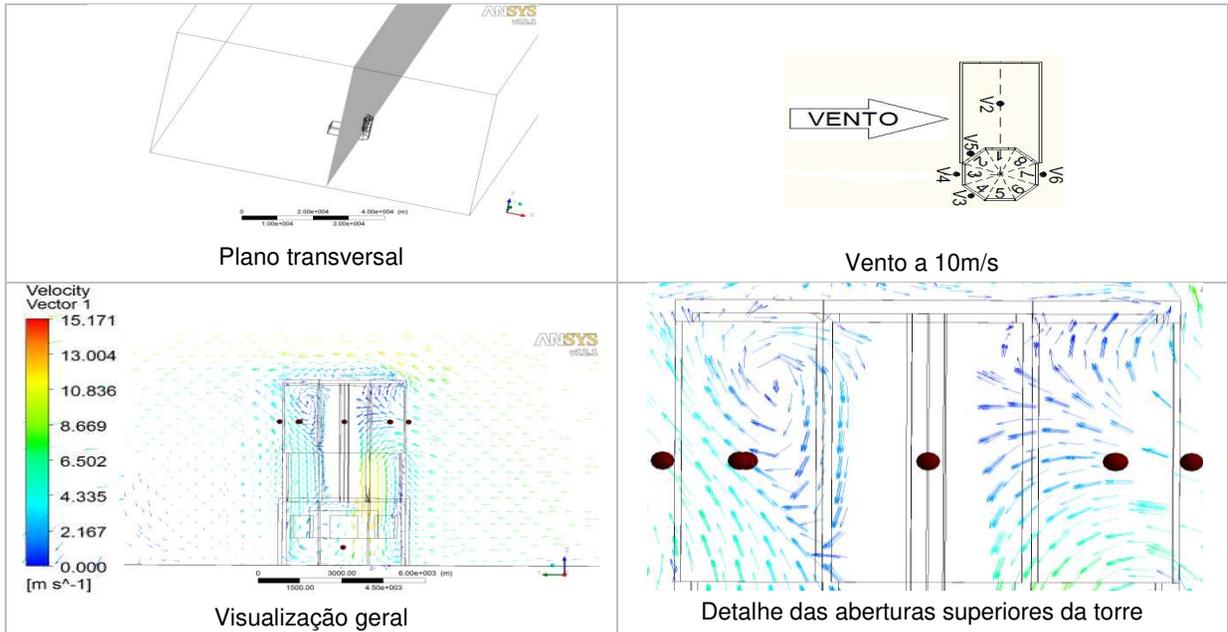
d)



e)



f)



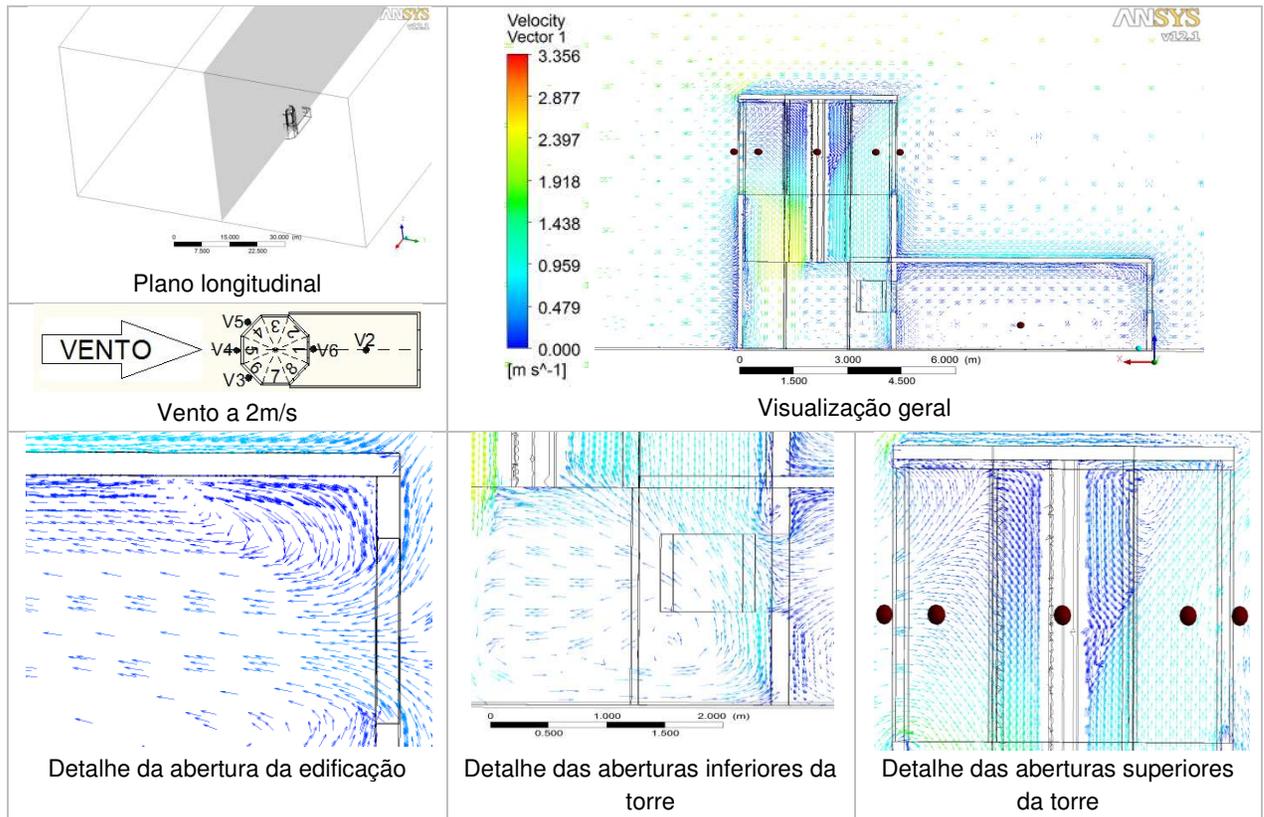
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 8: posições das aberturas da torre

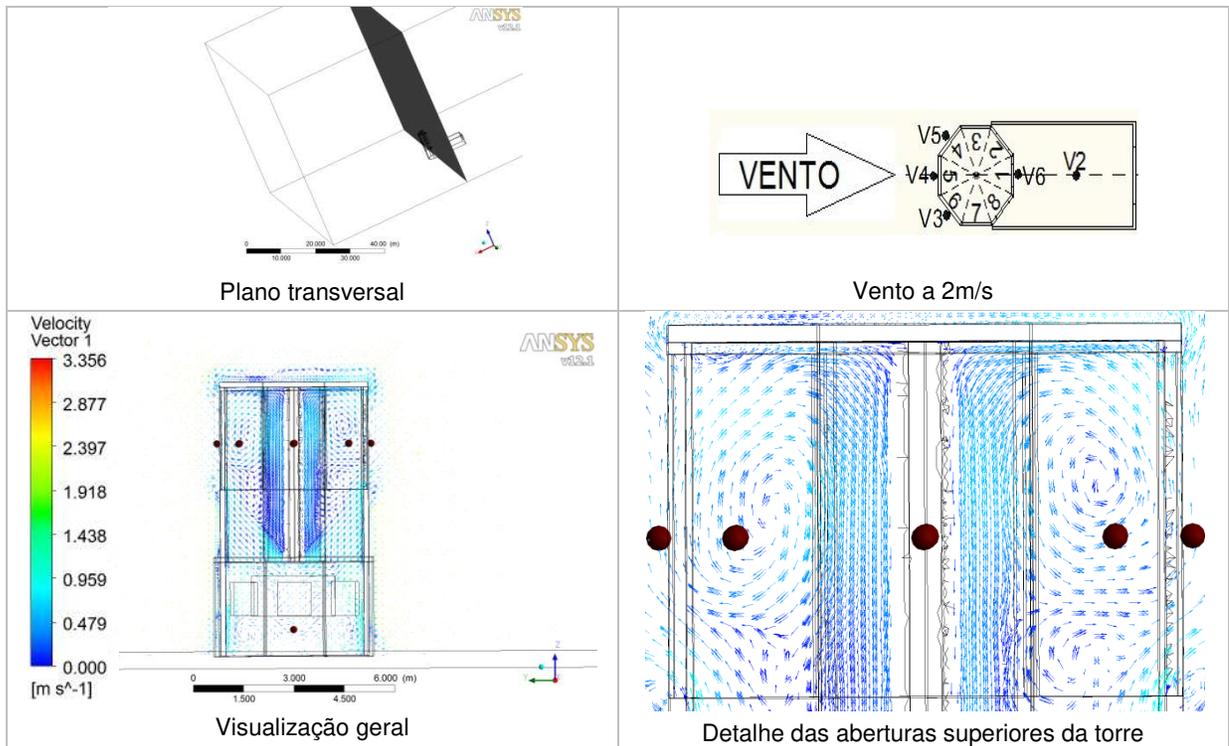
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.18 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre octodirecional a 90°

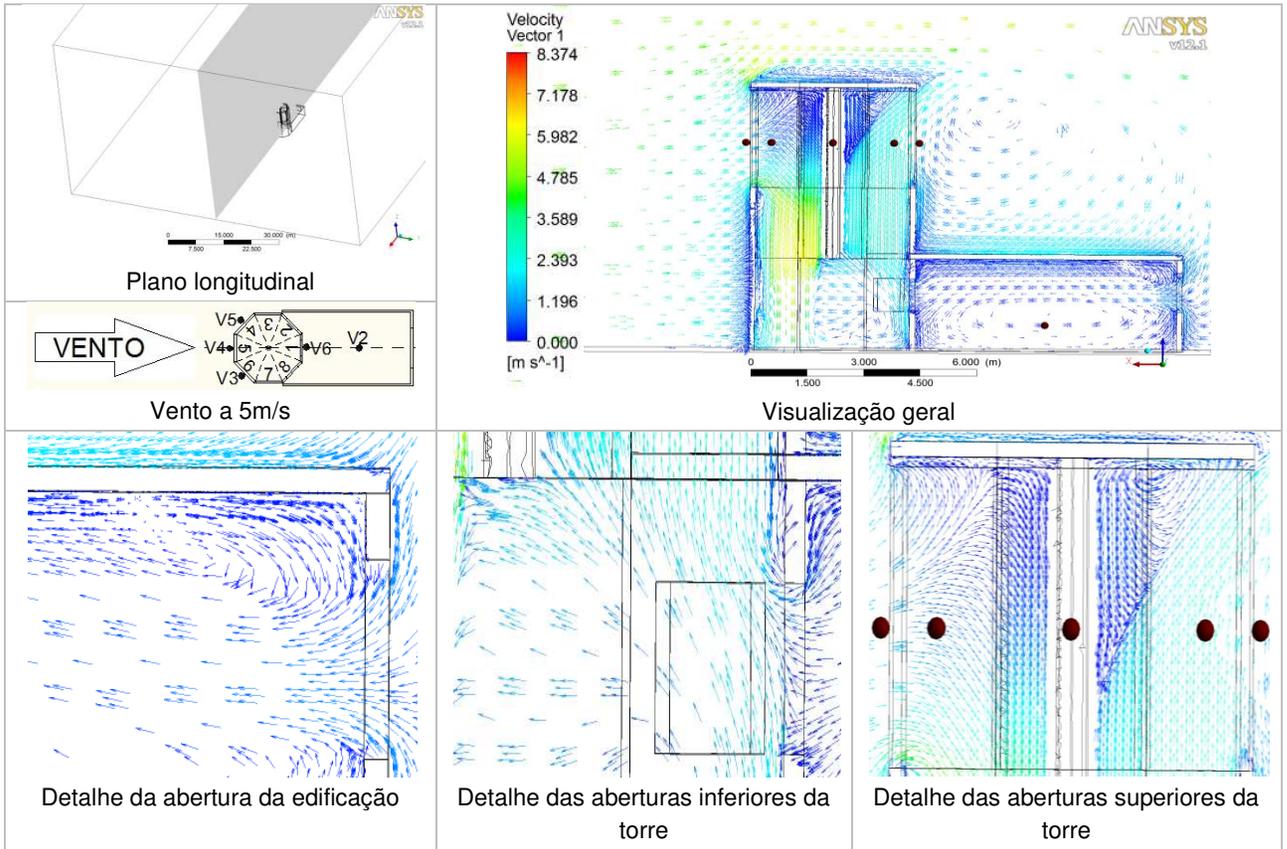
a)



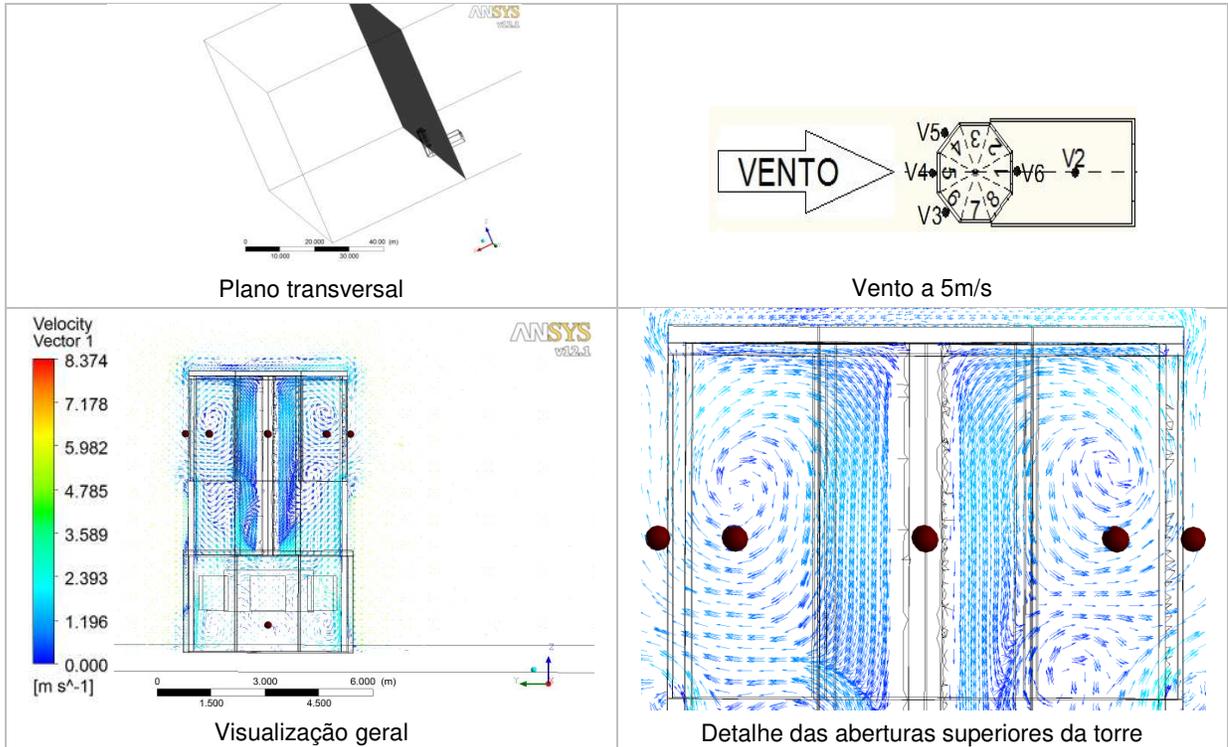
b)



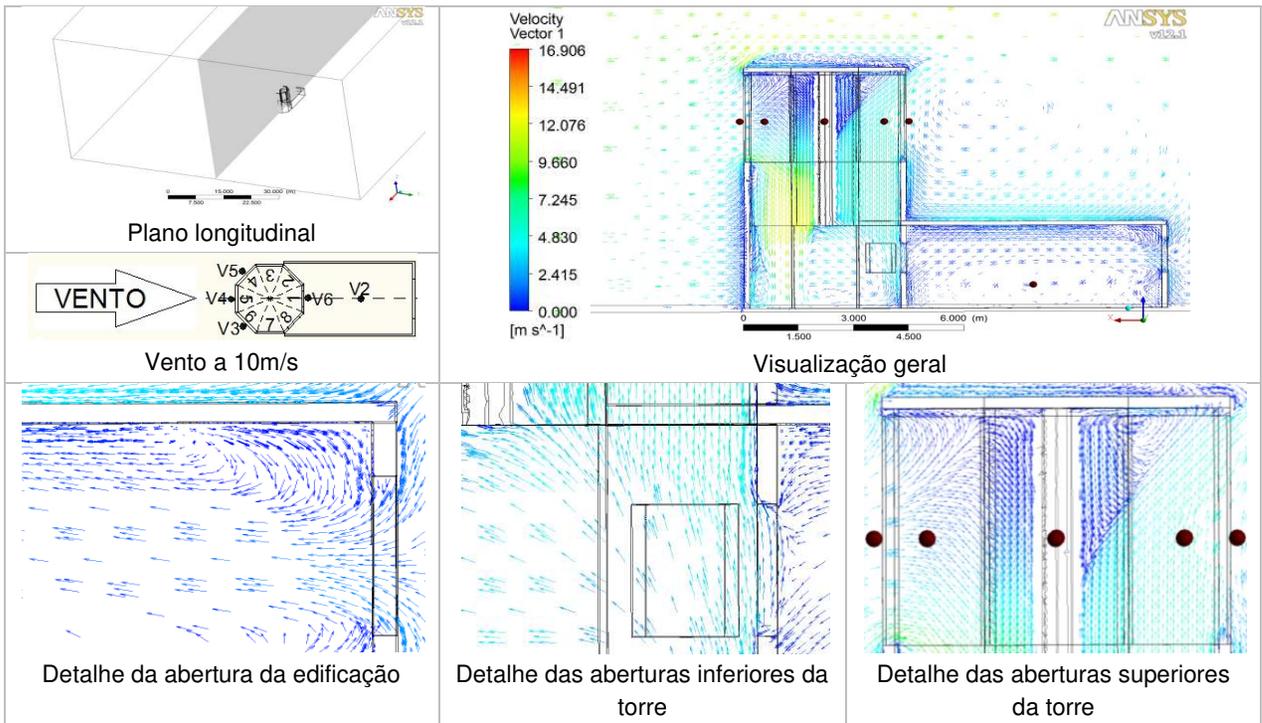
c)



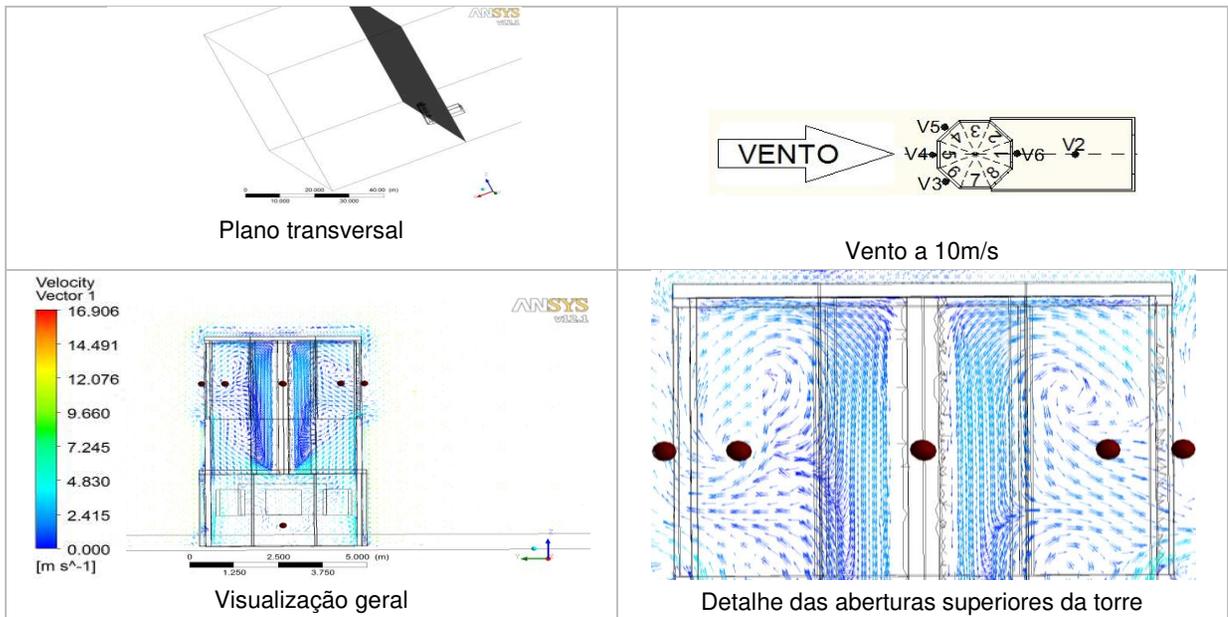
d)



e)



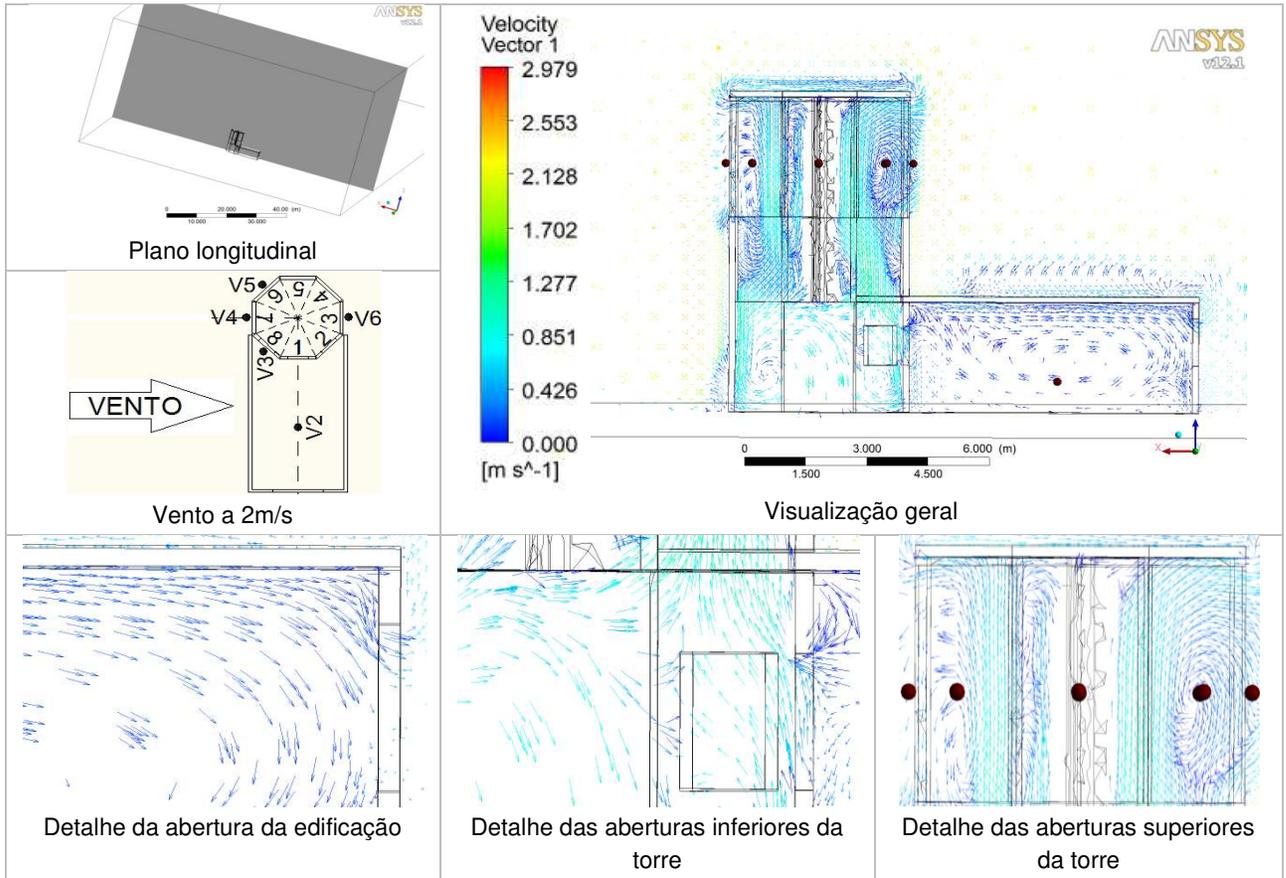
f)



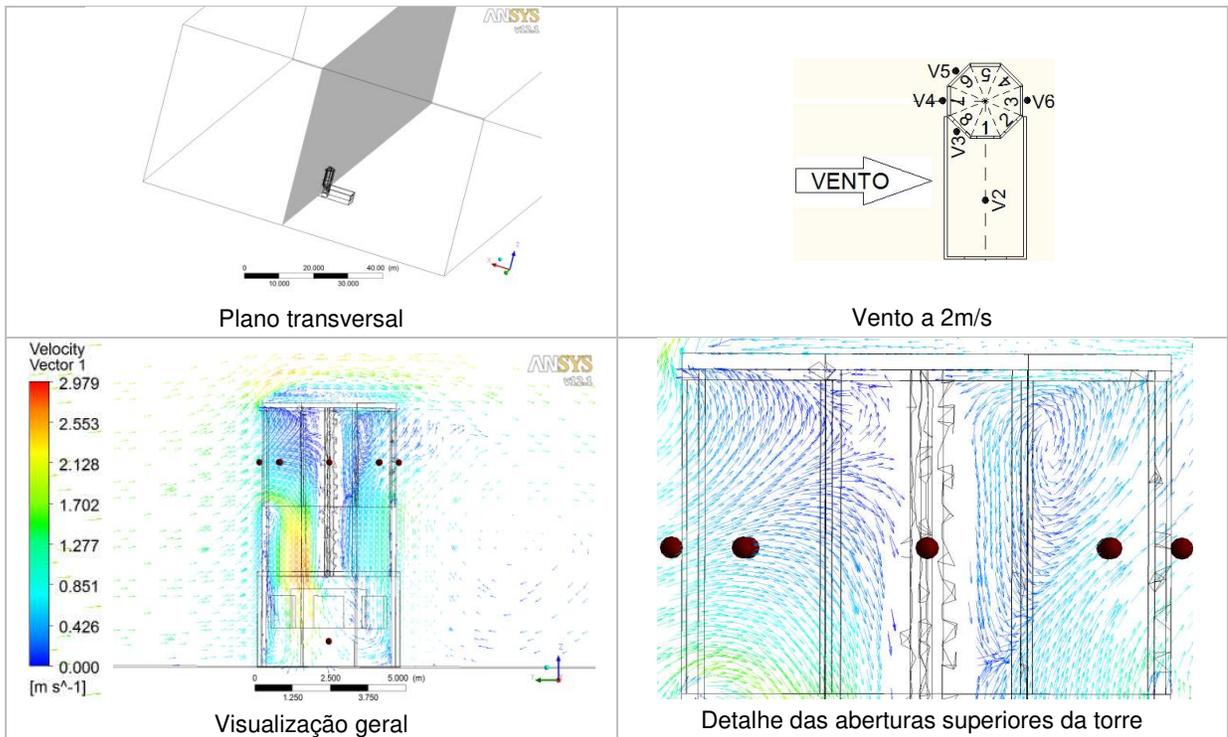
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento
 1 a 8: posições das aberturas da torre
 ● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.19 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre octodirecional a 180°

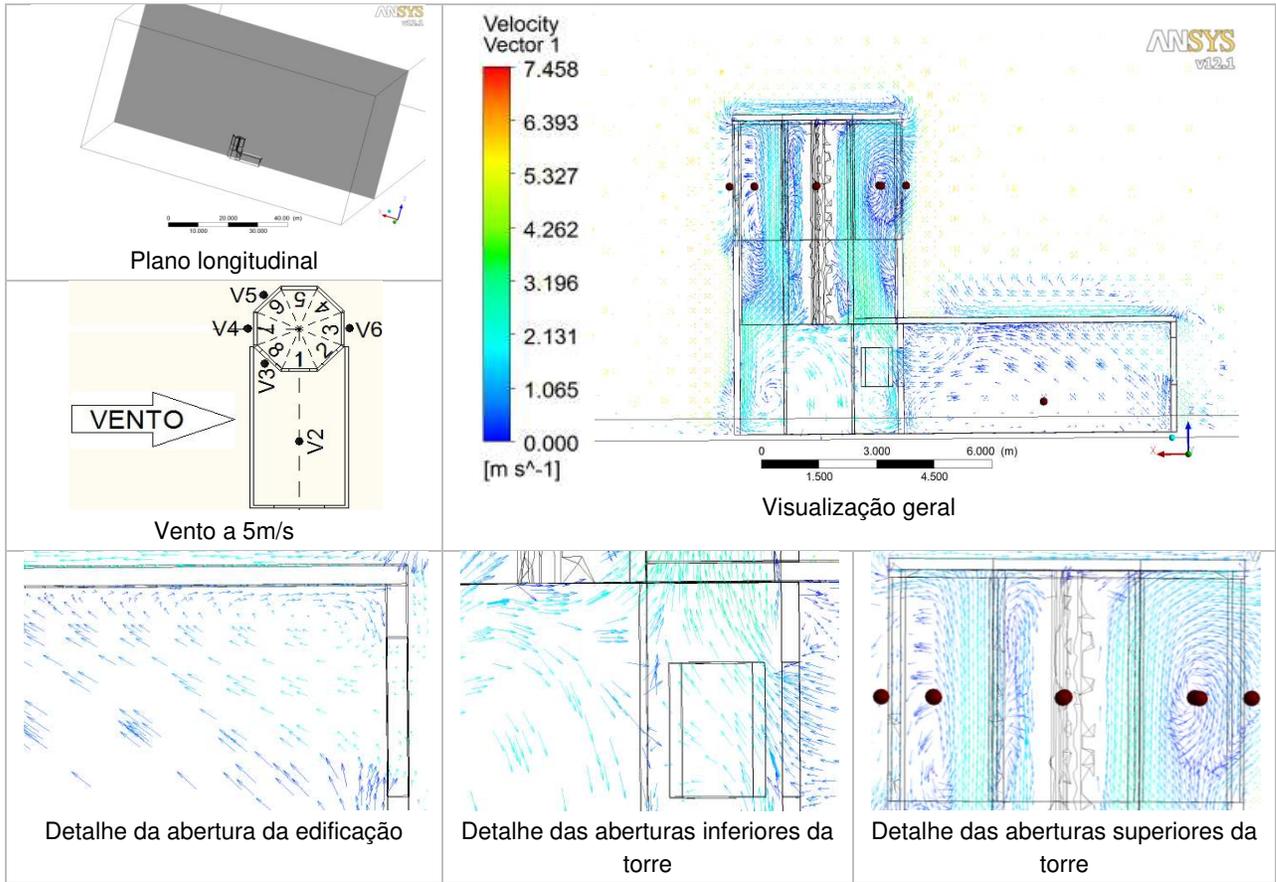
a)



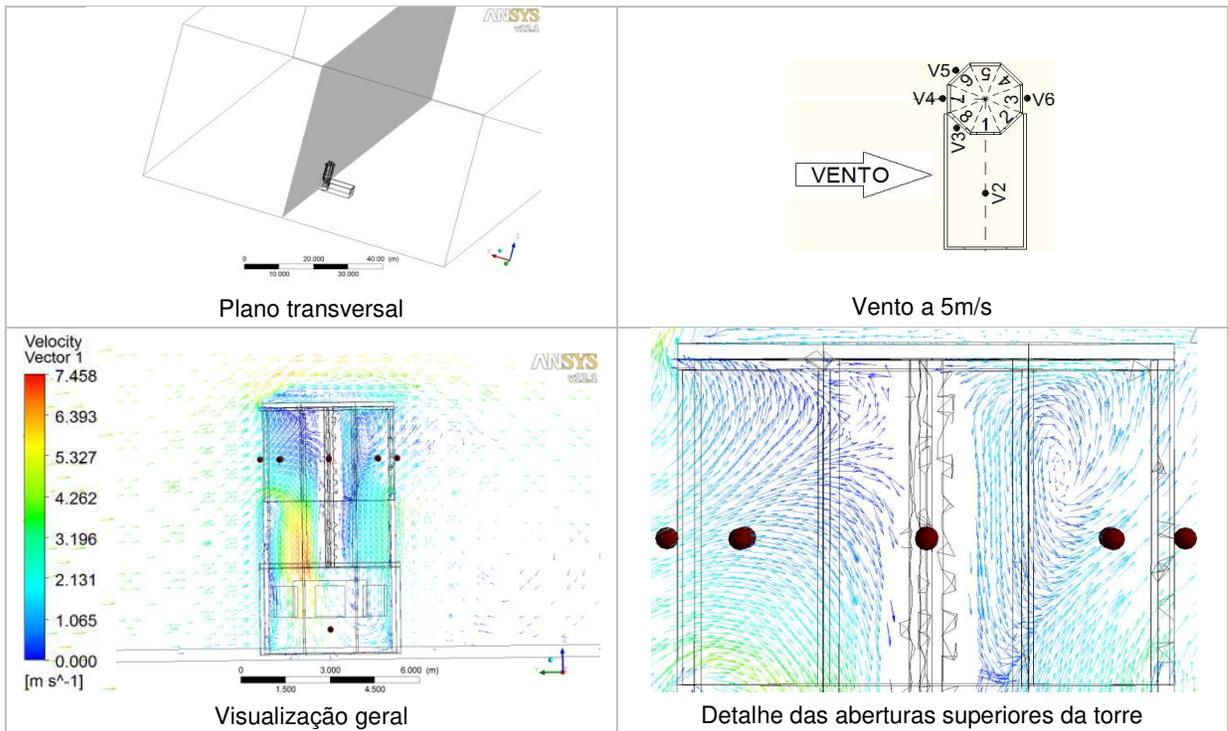
b)



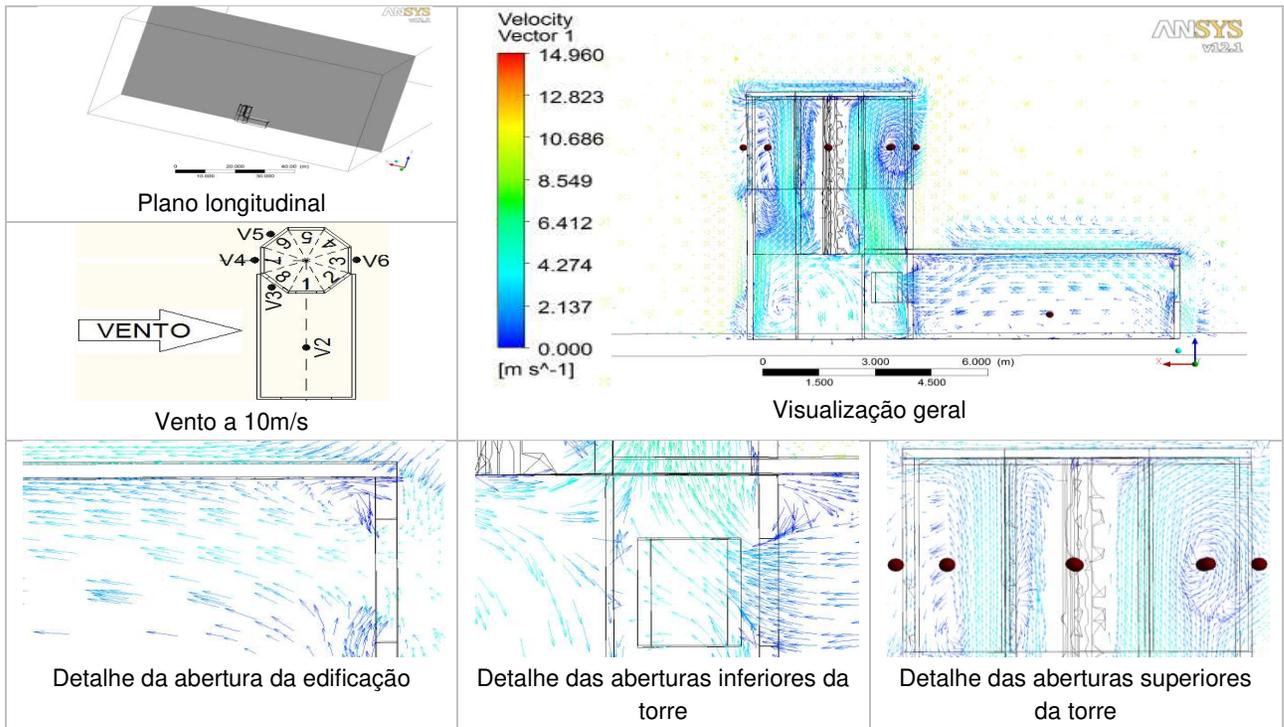
c)



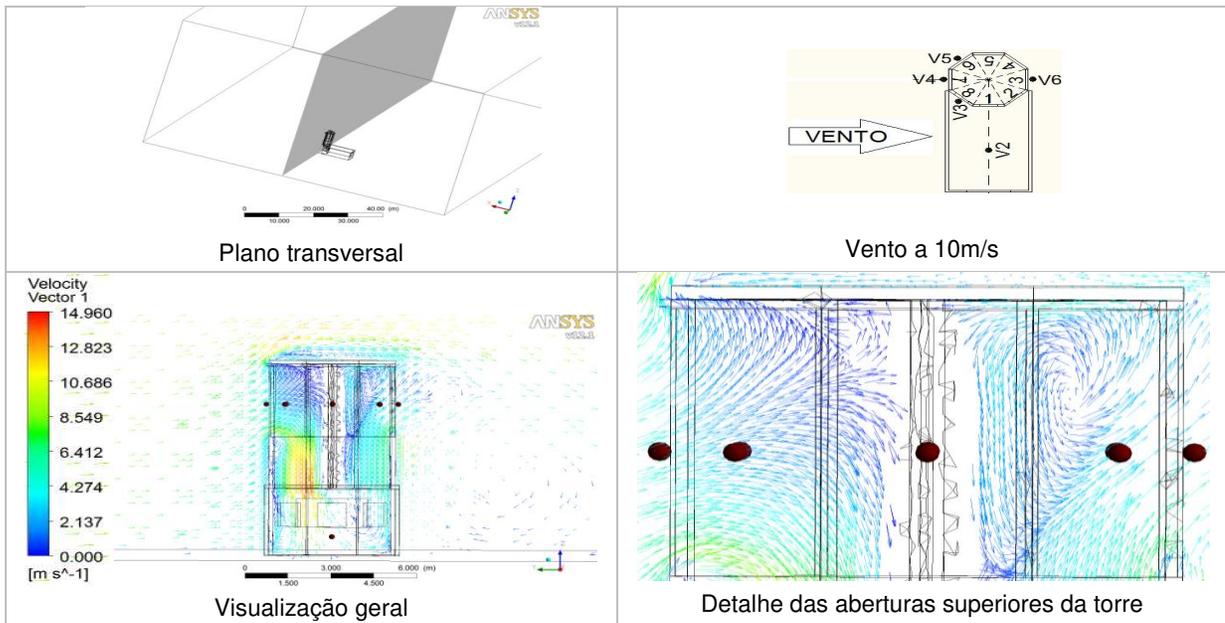
d)



e)



f)



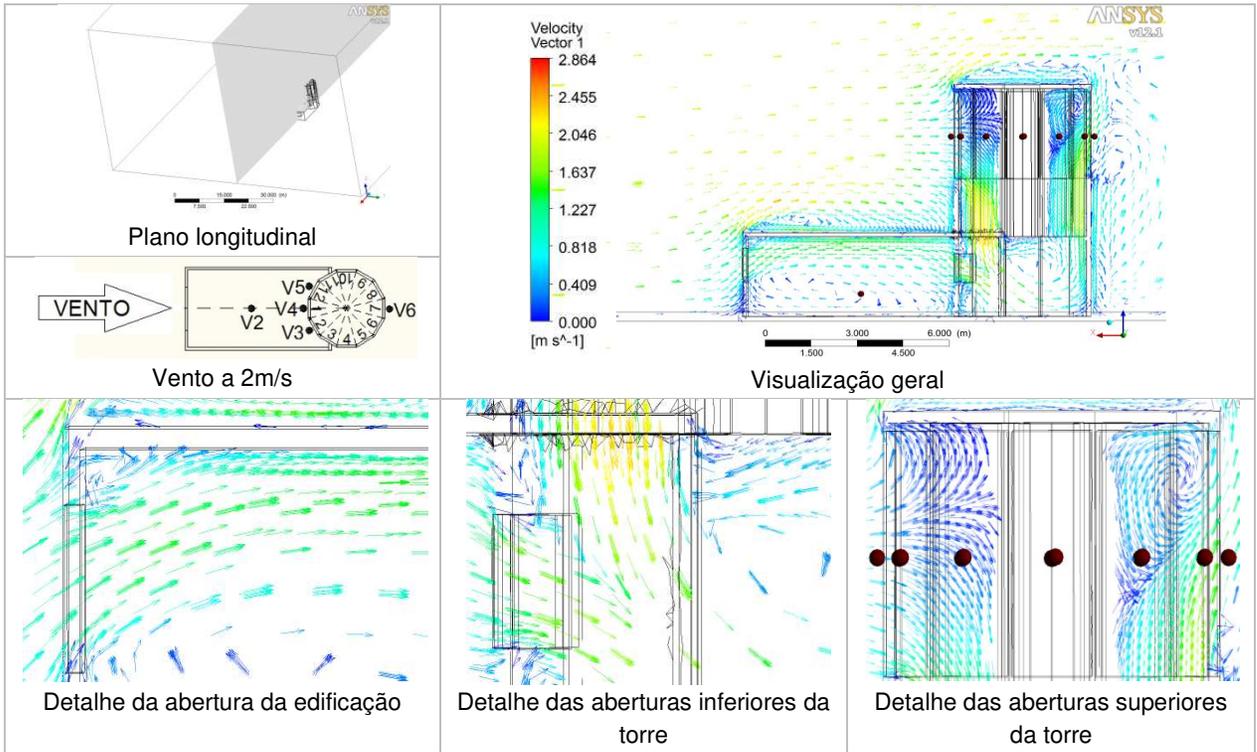
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 8: posições das aberturas da torre

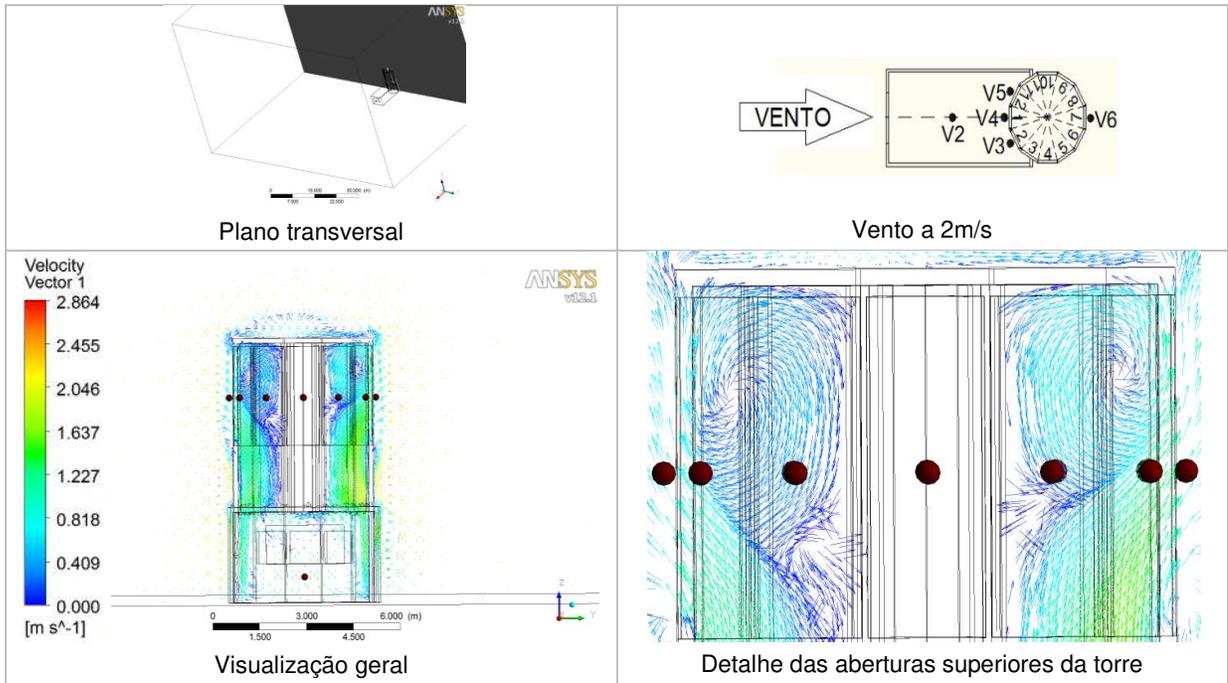
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.20 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre octodirecional a 270°

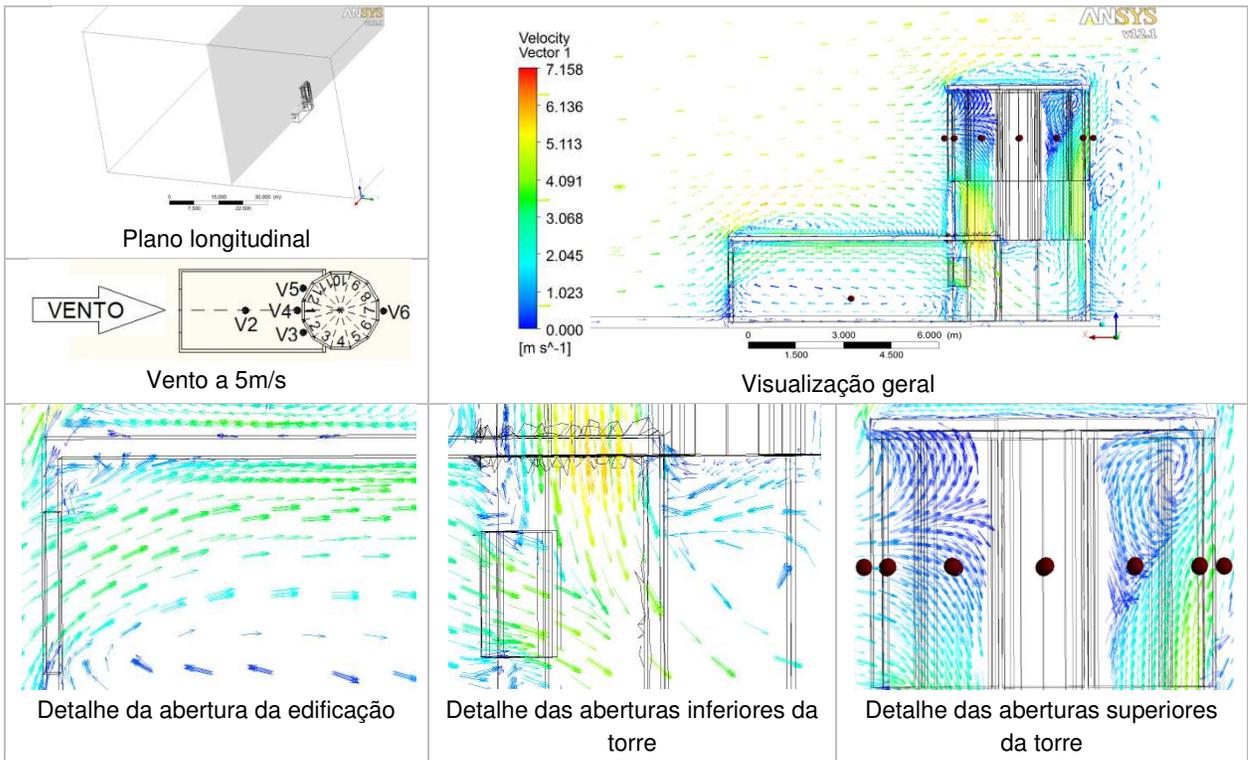
a)



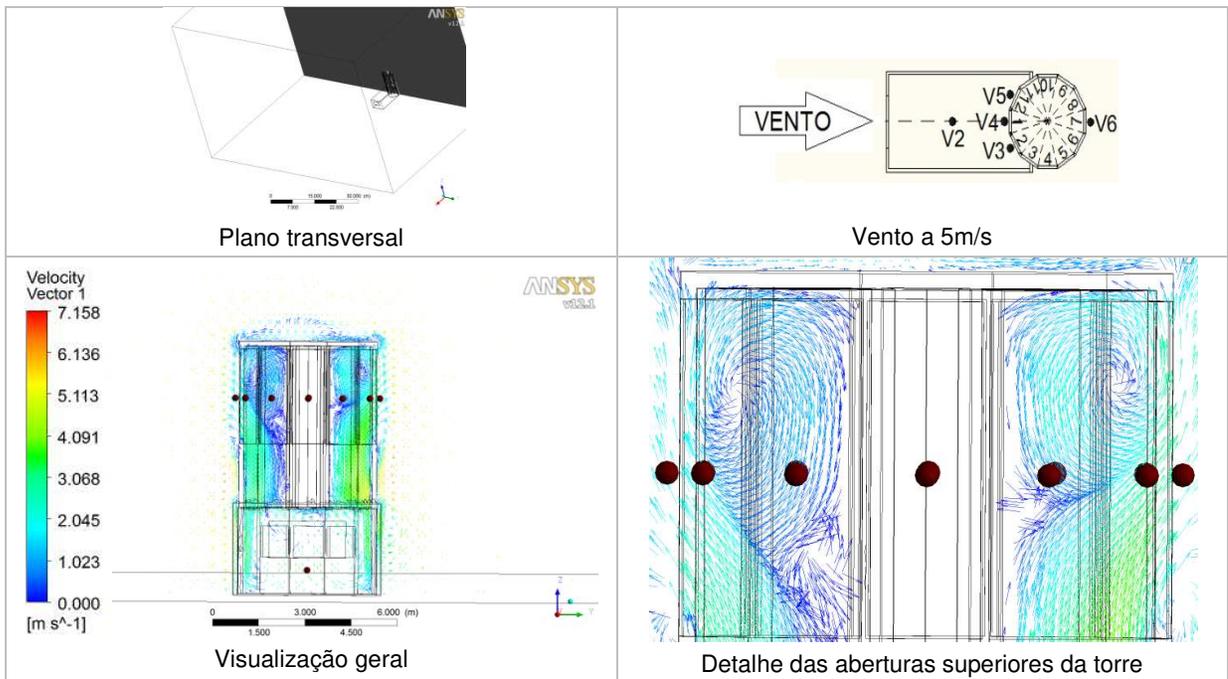
b)



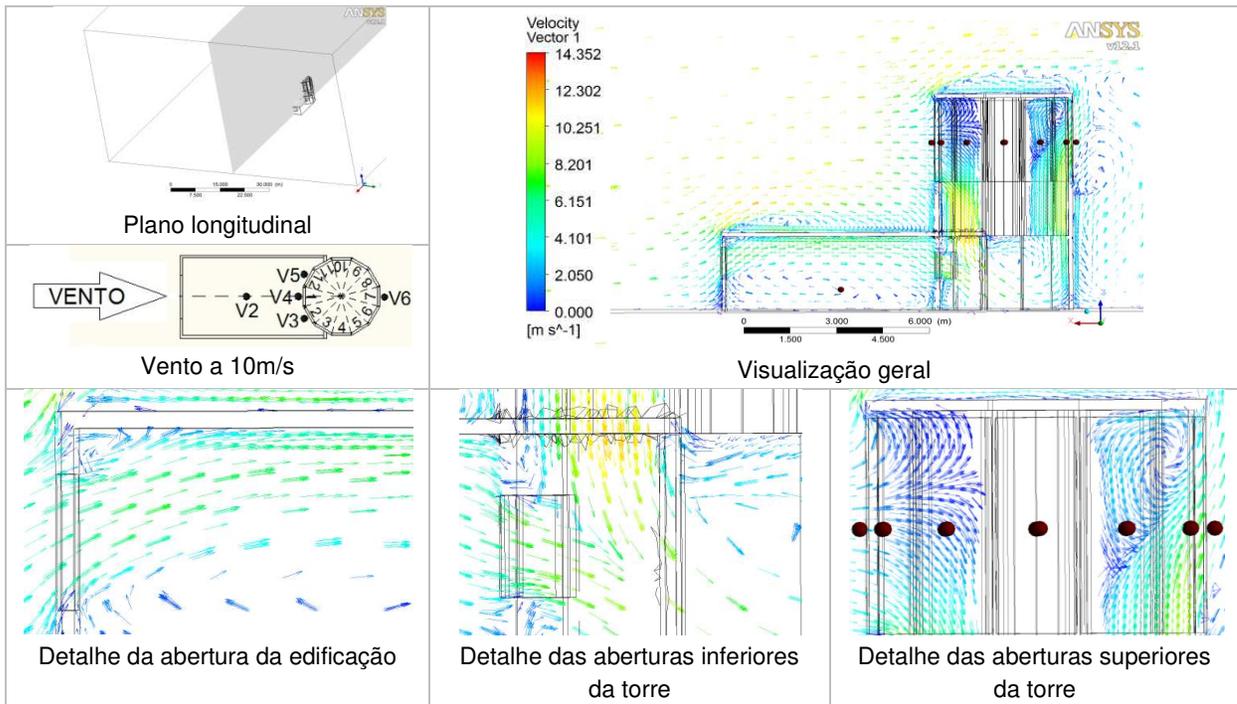
c)



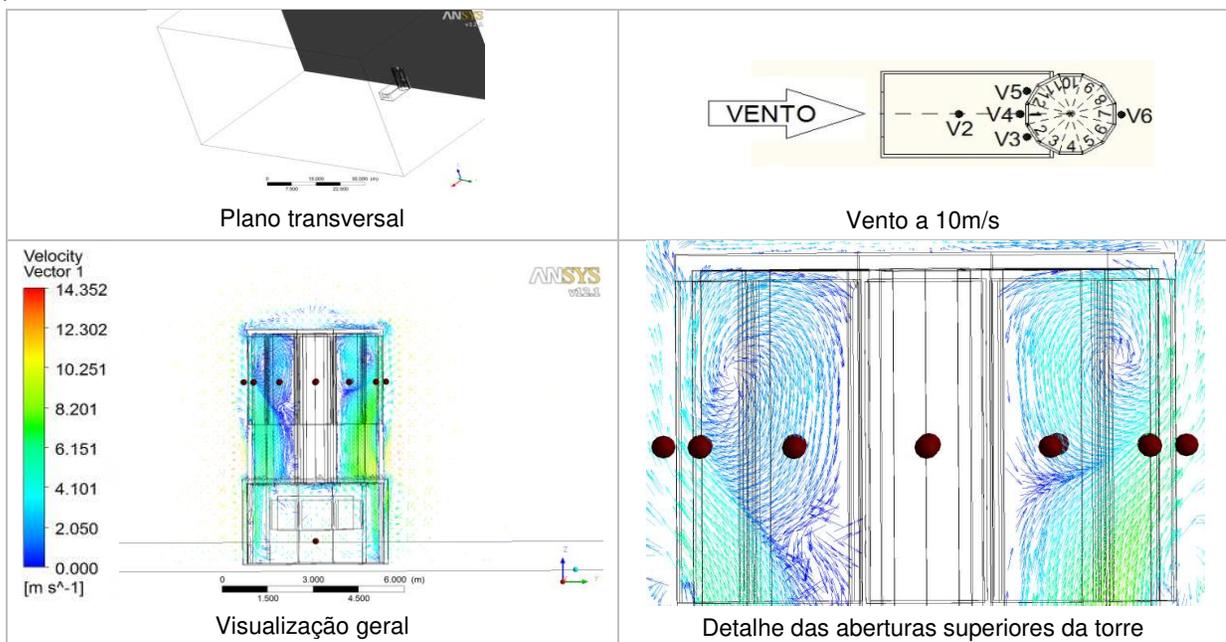
d)



e)



f)



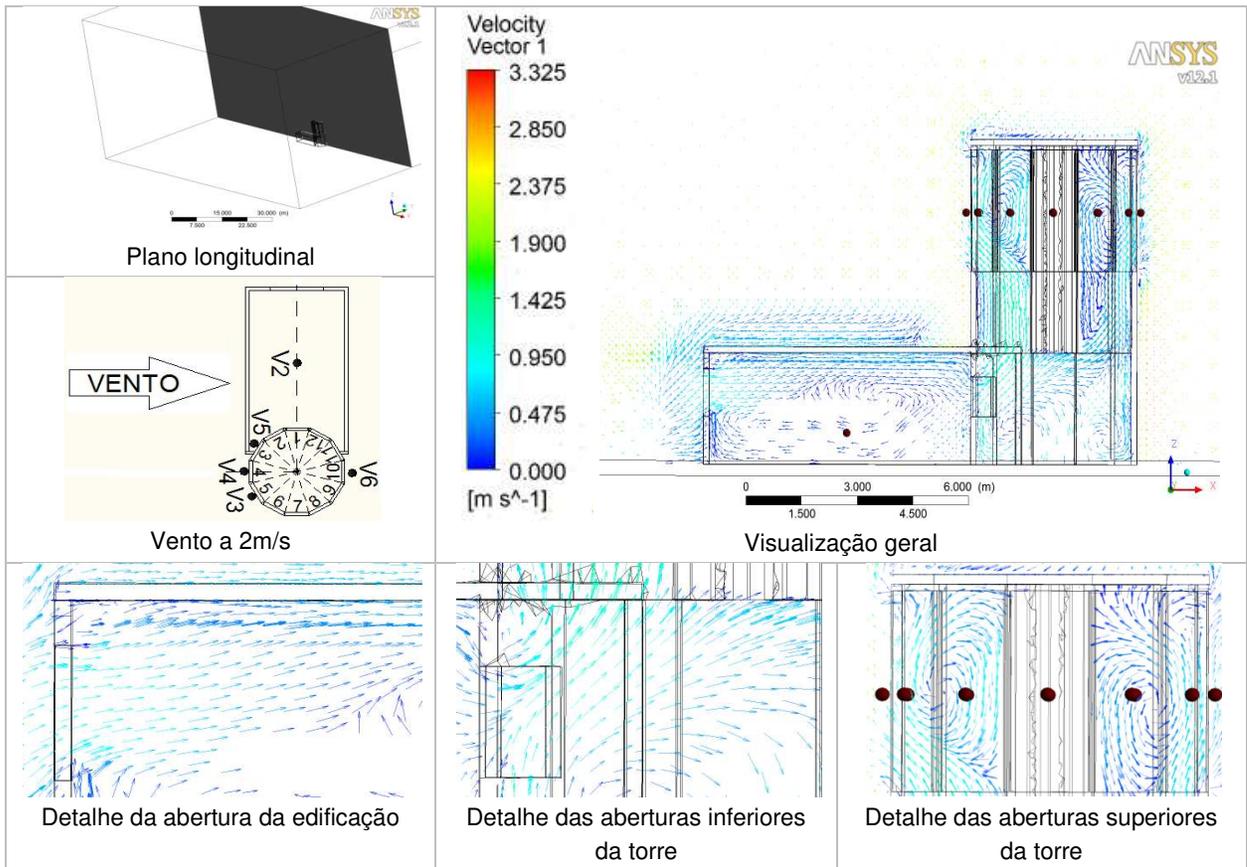
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 12: posições das aberturas da torre

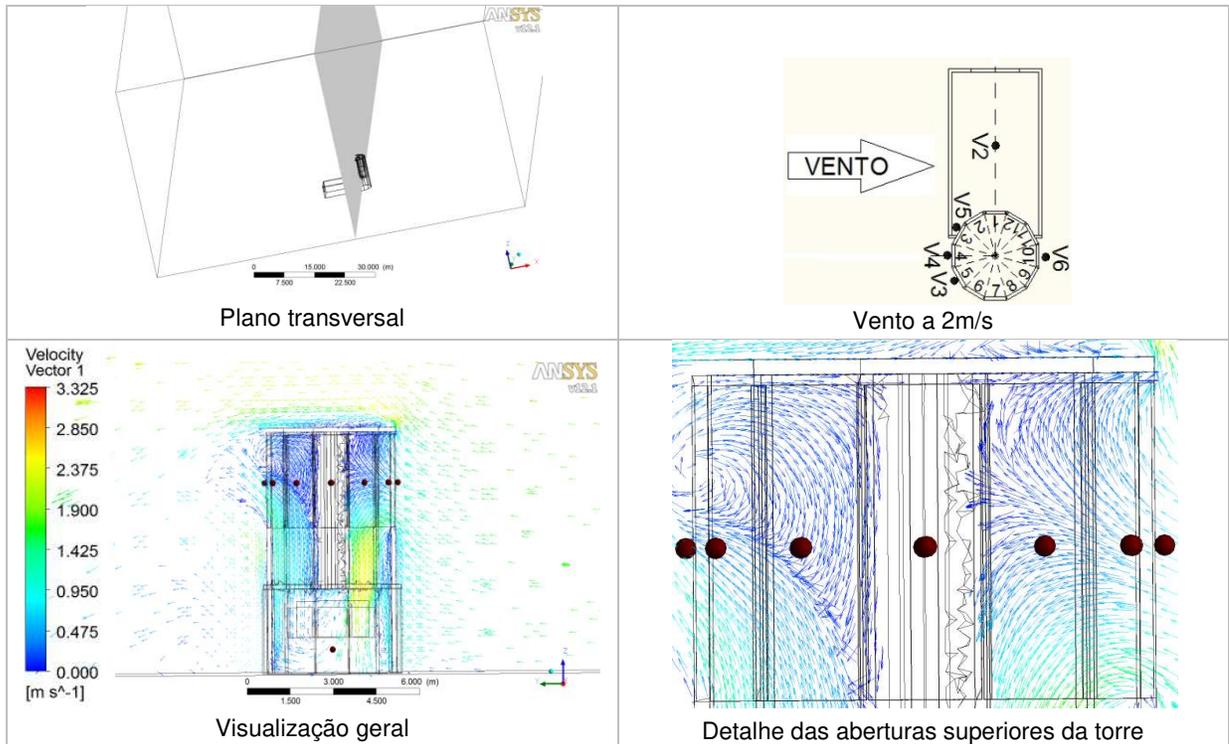
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.21 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre dodecadirecional a 0°

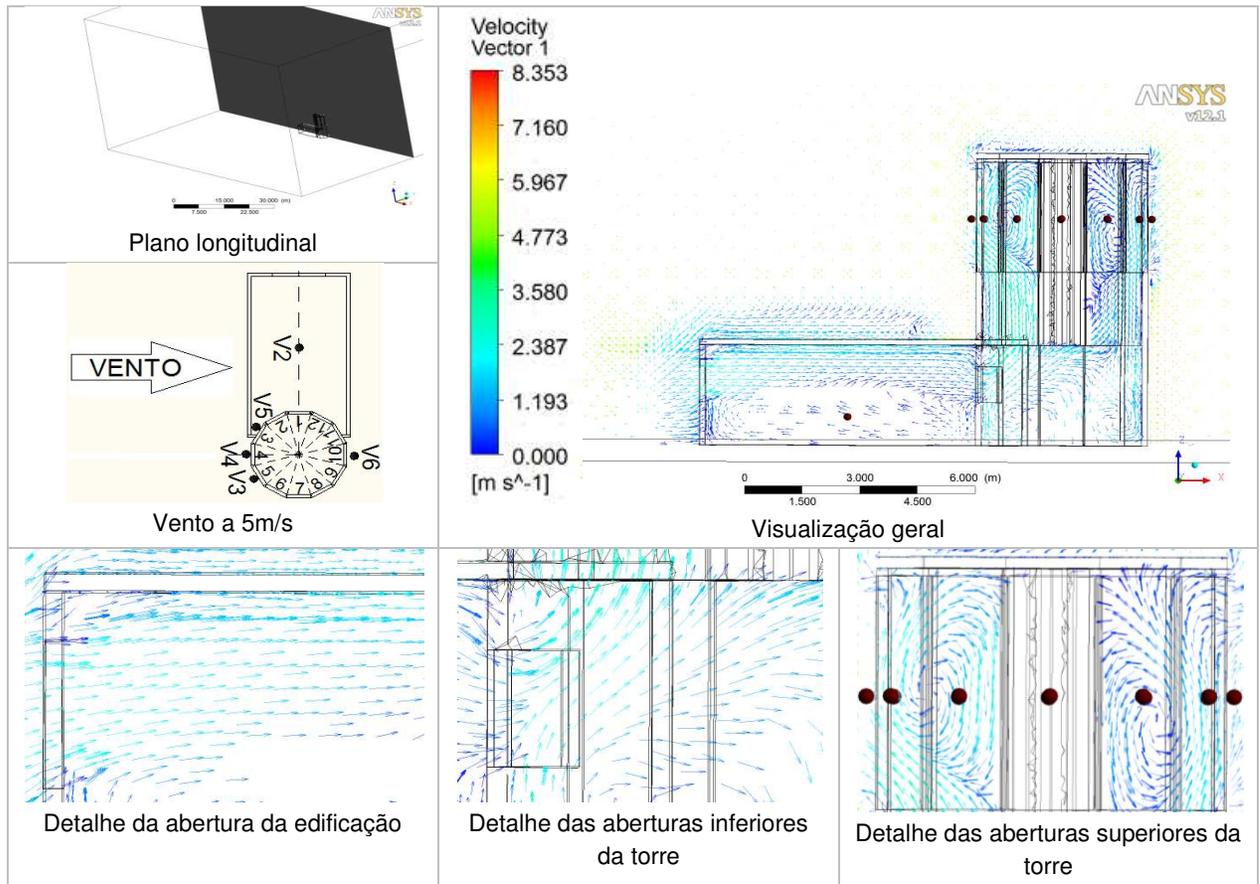
a)



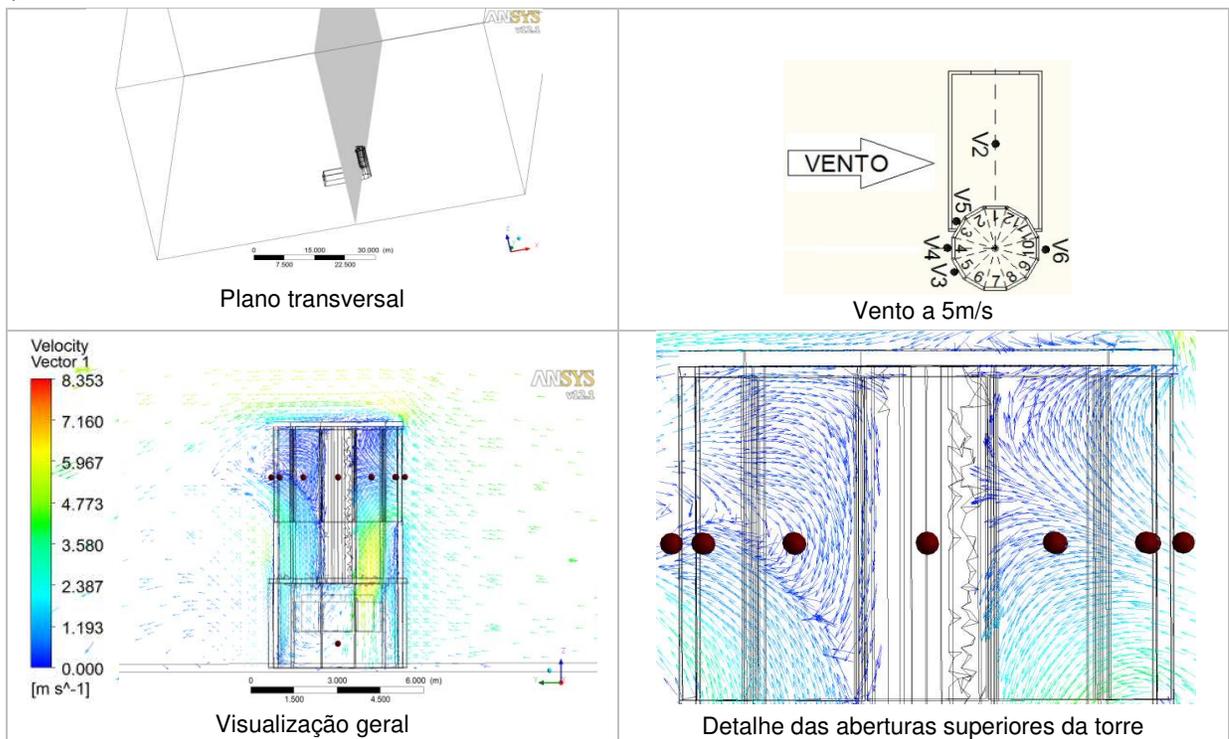
b)



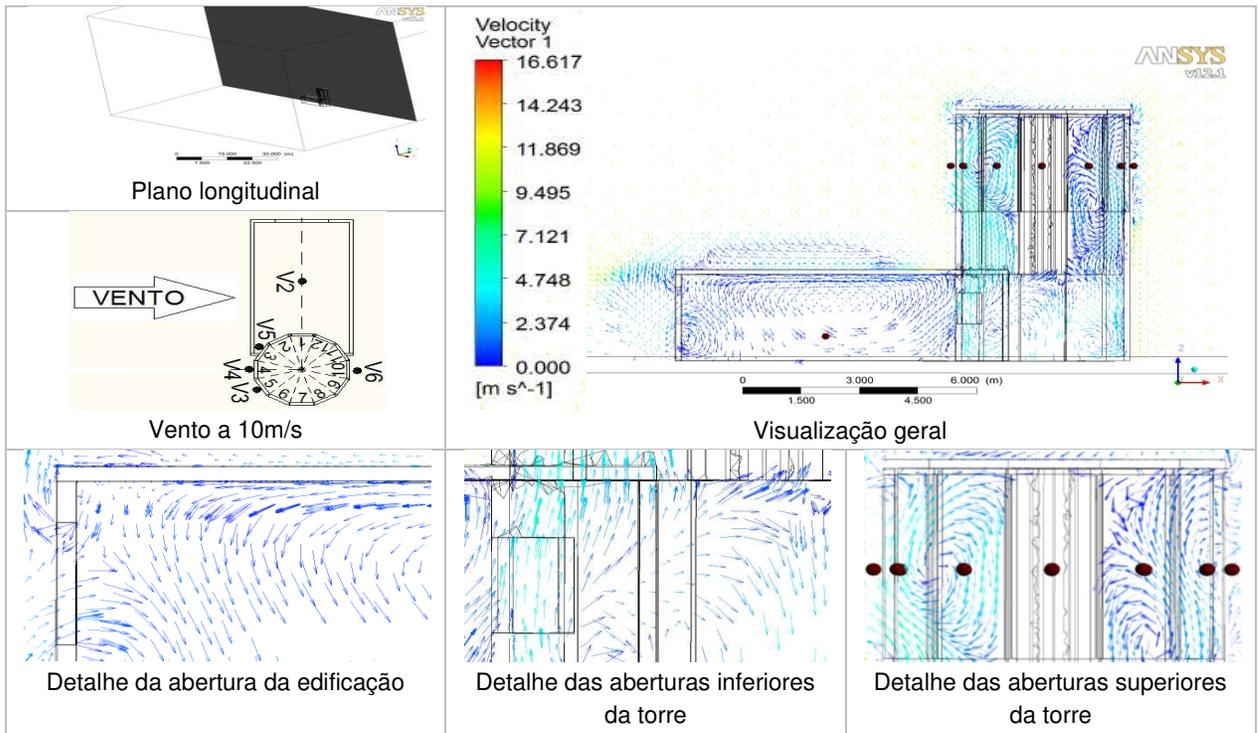
c)



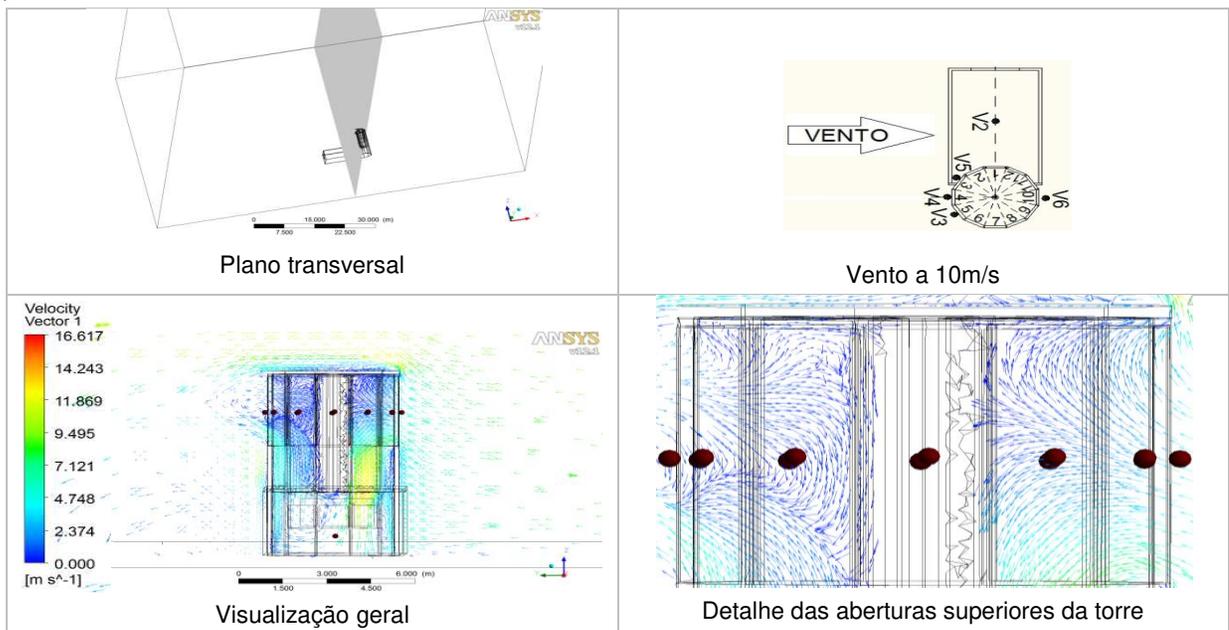
d)



e)



f)

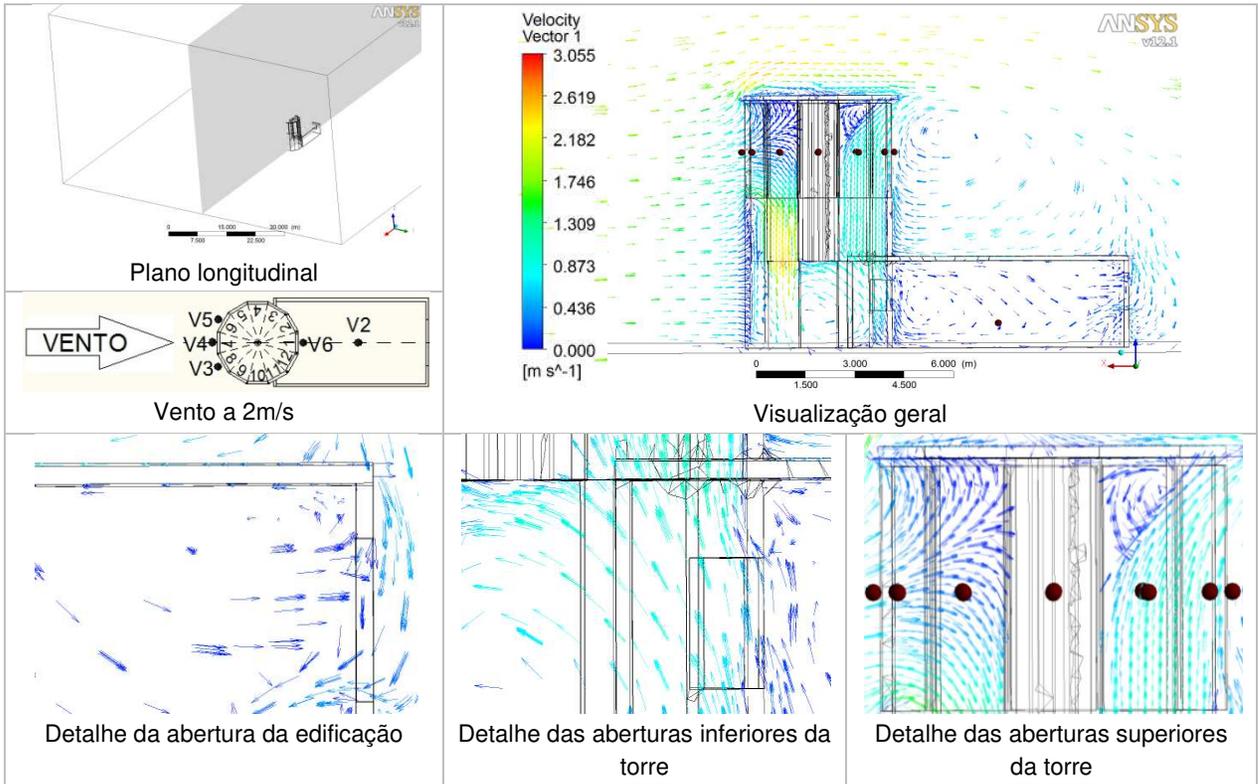


V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento
 1 a 12: posições das aberturas da torre

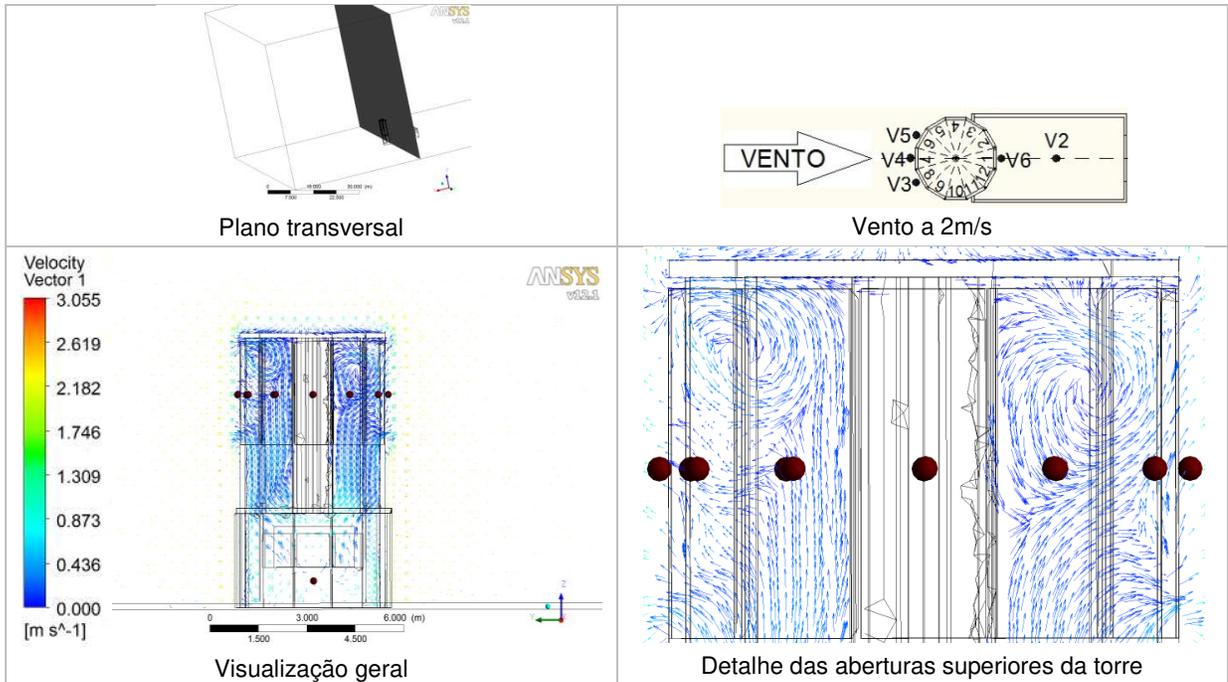
● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.22 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre dodecadirecional a 90°
 175

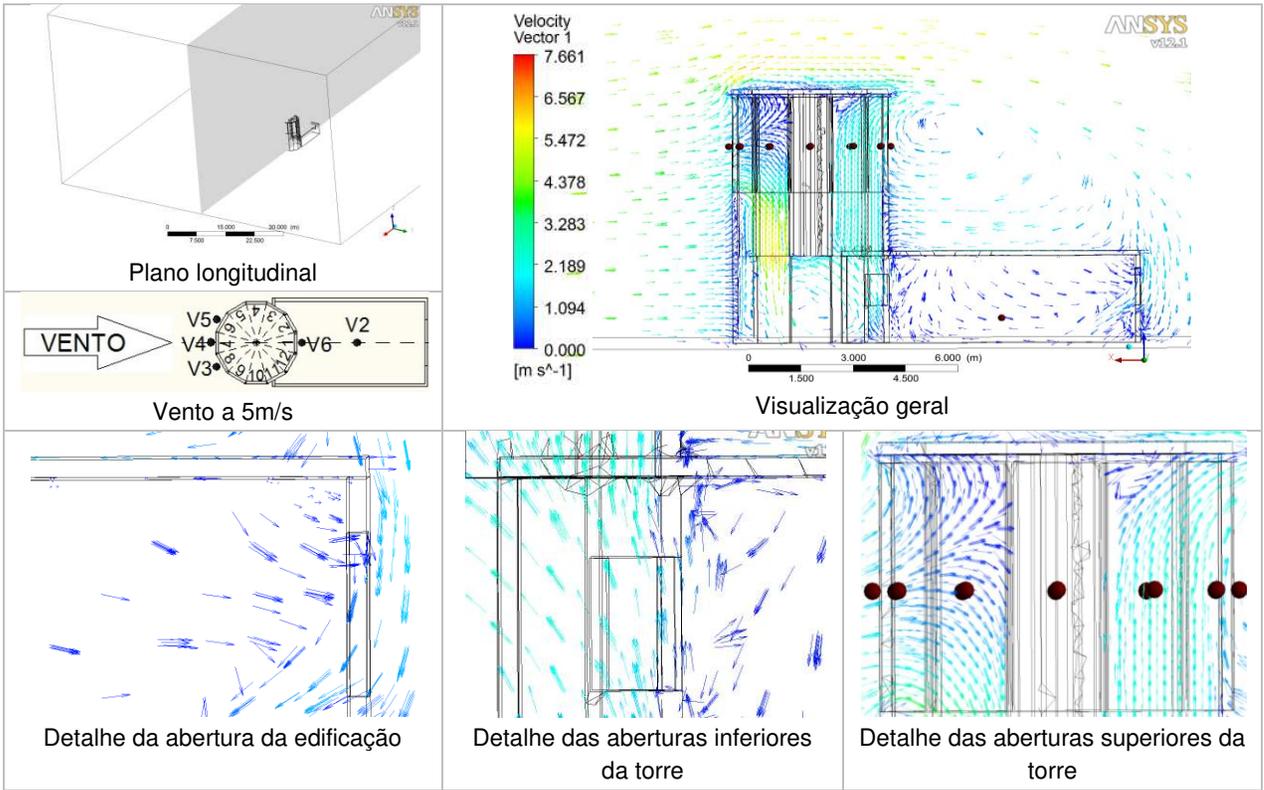
a)



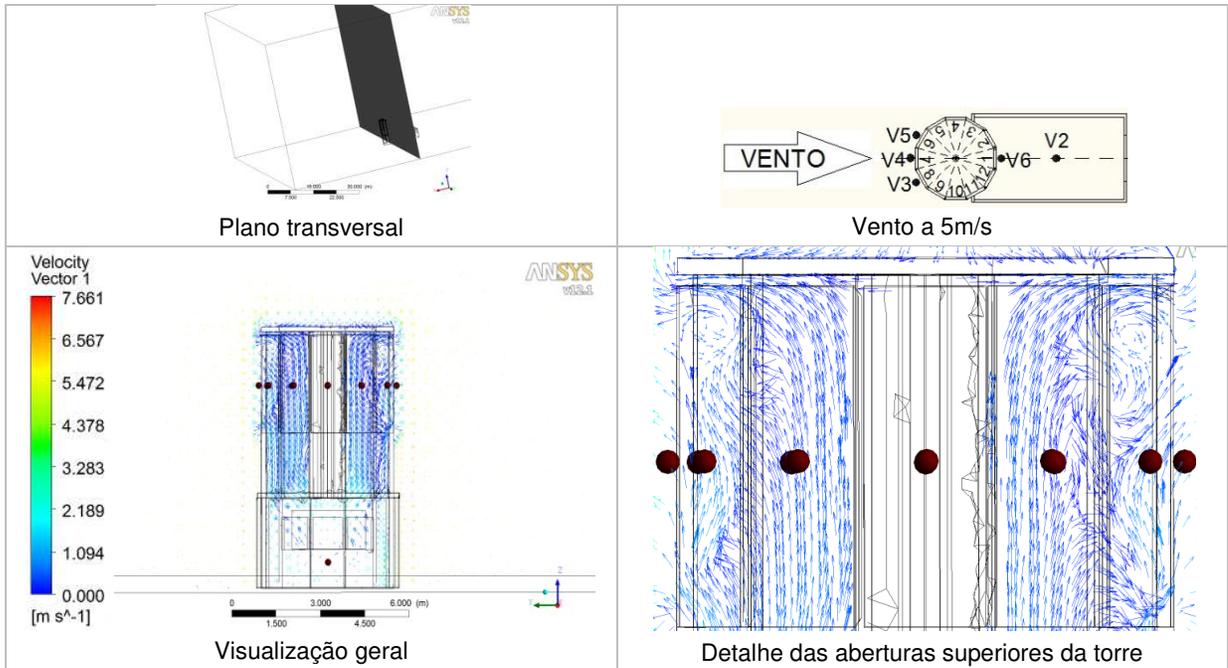
b)



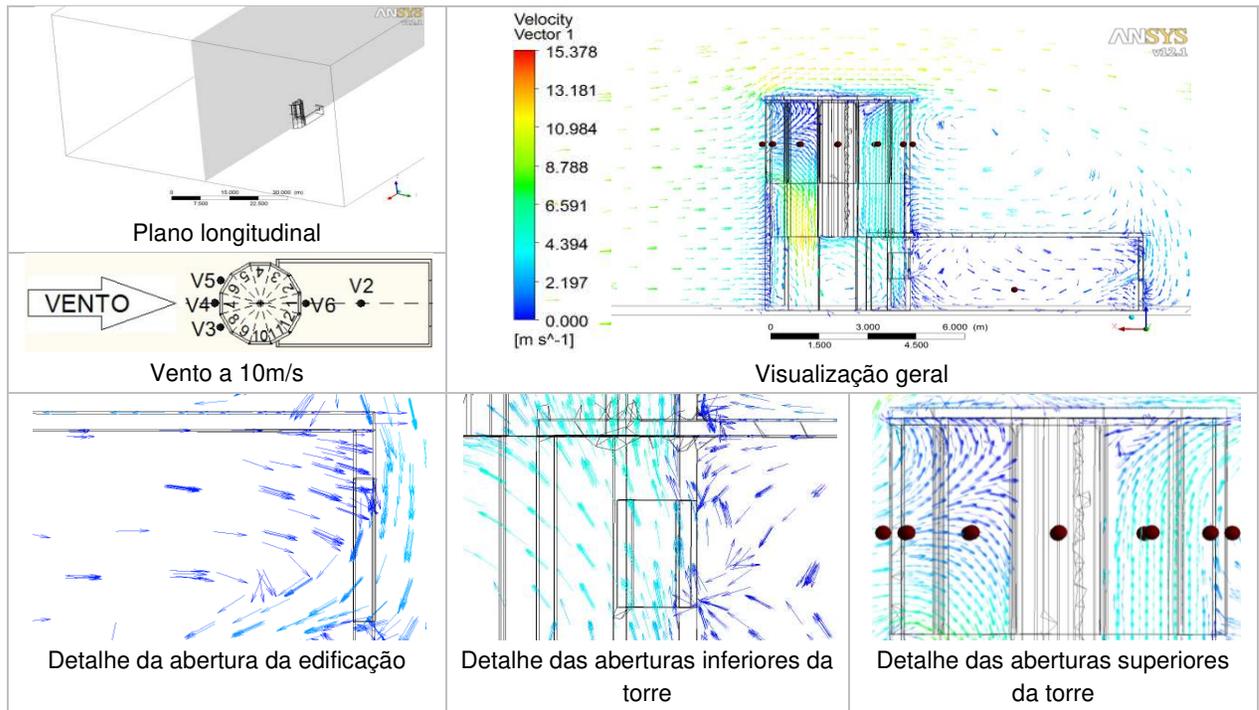
c)



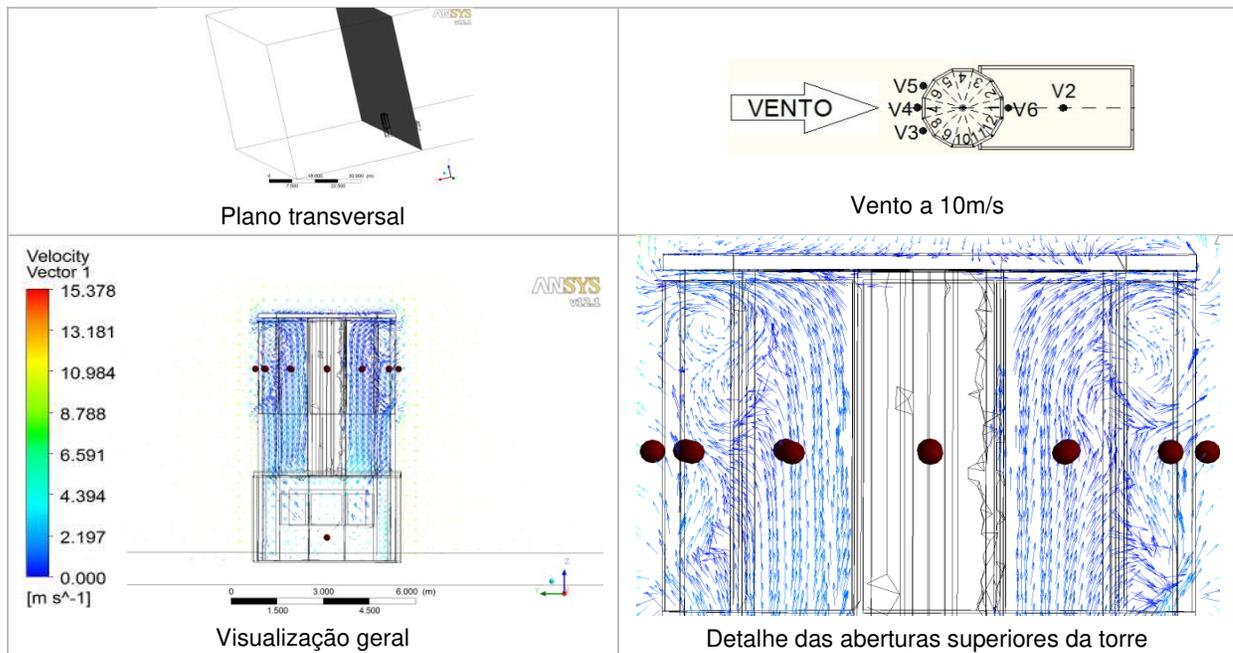
d)



e)



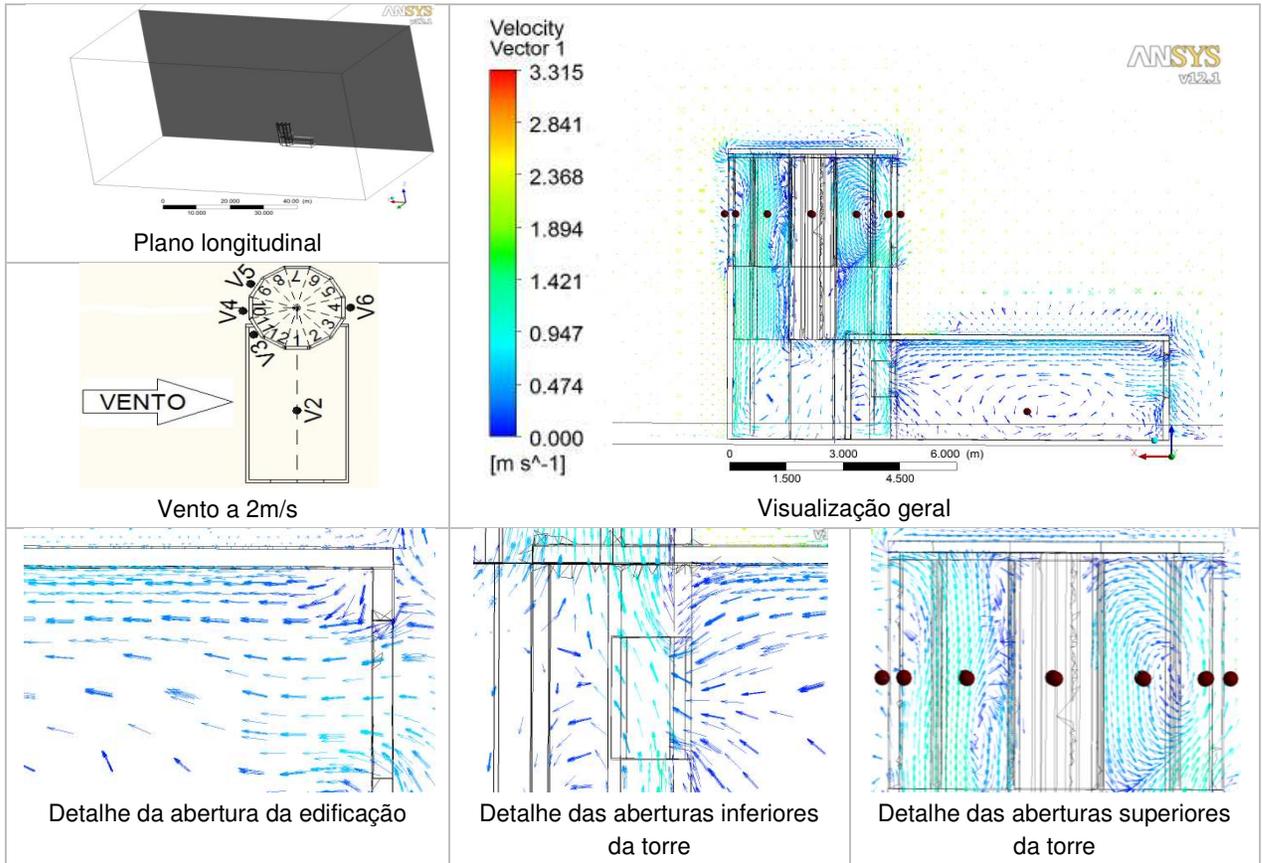
f)



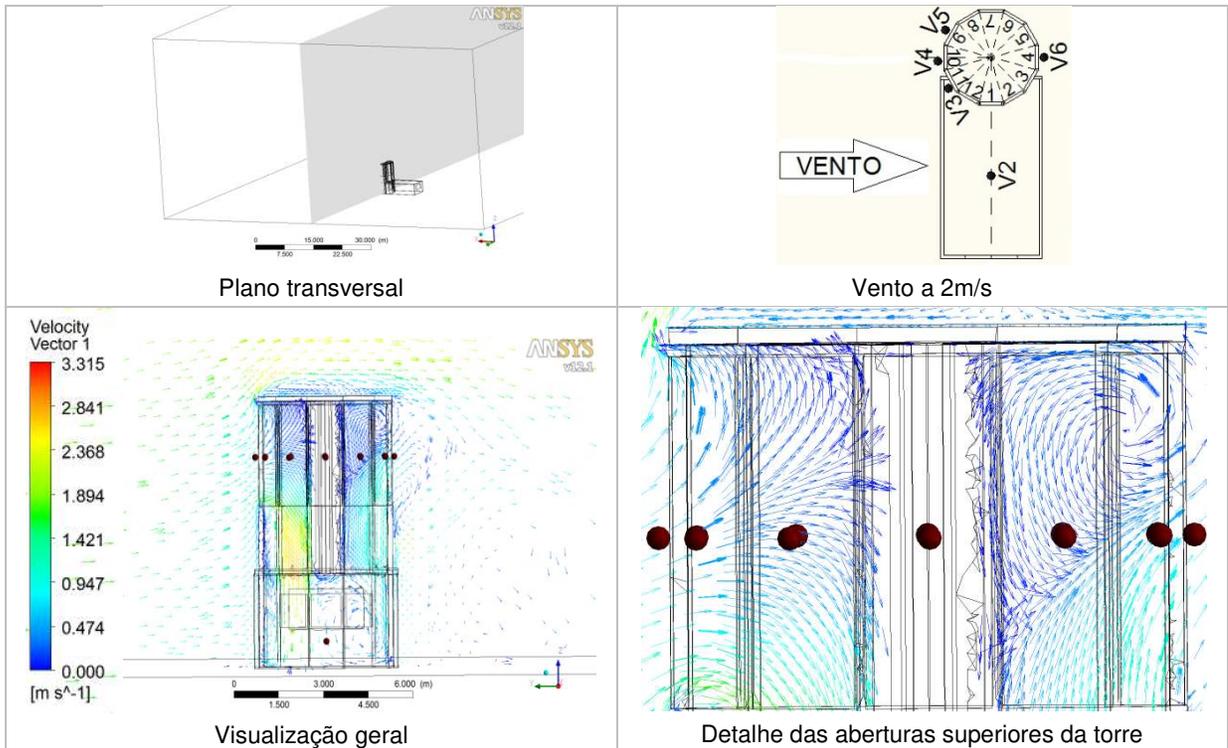
V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento
 1 a 12: posições das aberturas da torre
 ● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

Figura 4.23 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre dodecadirecional a 180°
 178

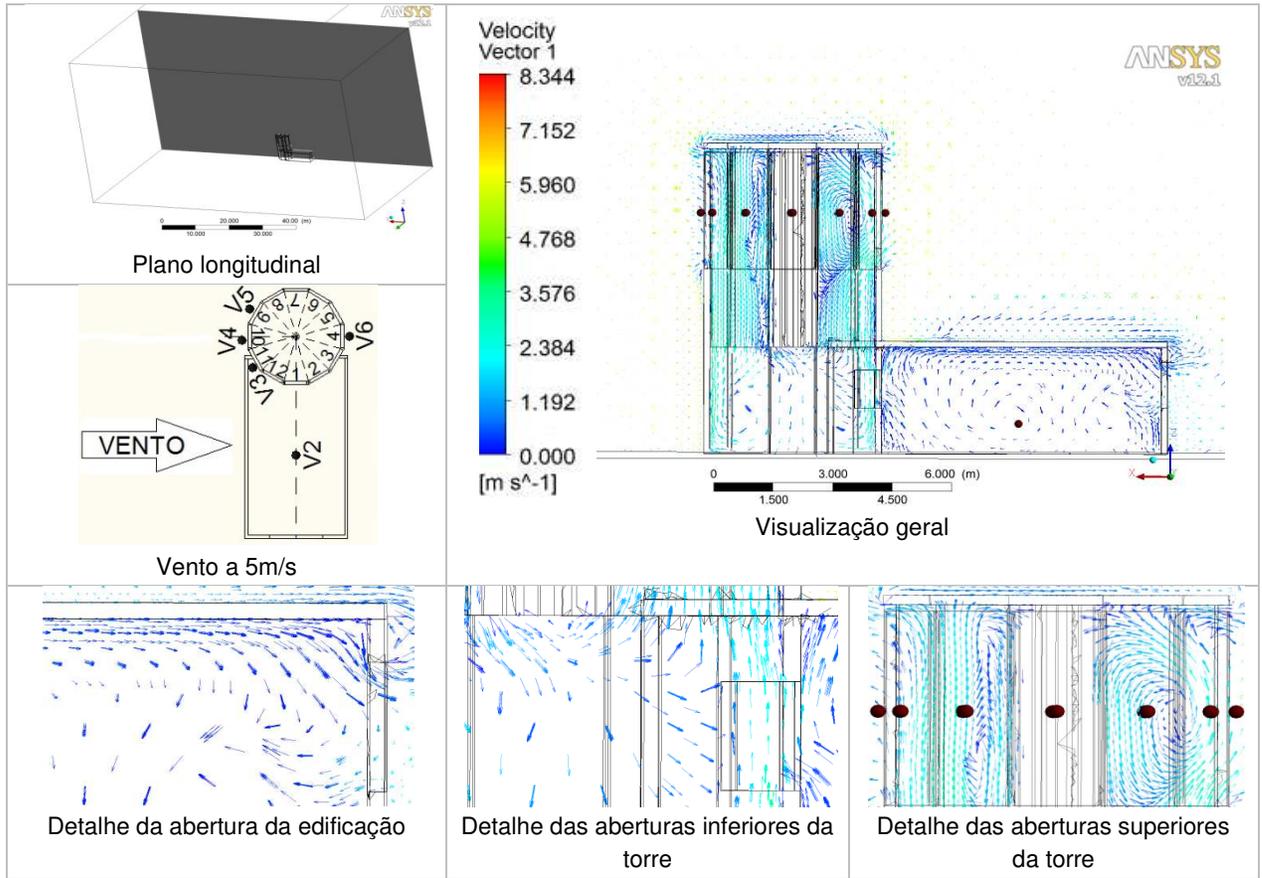
a)



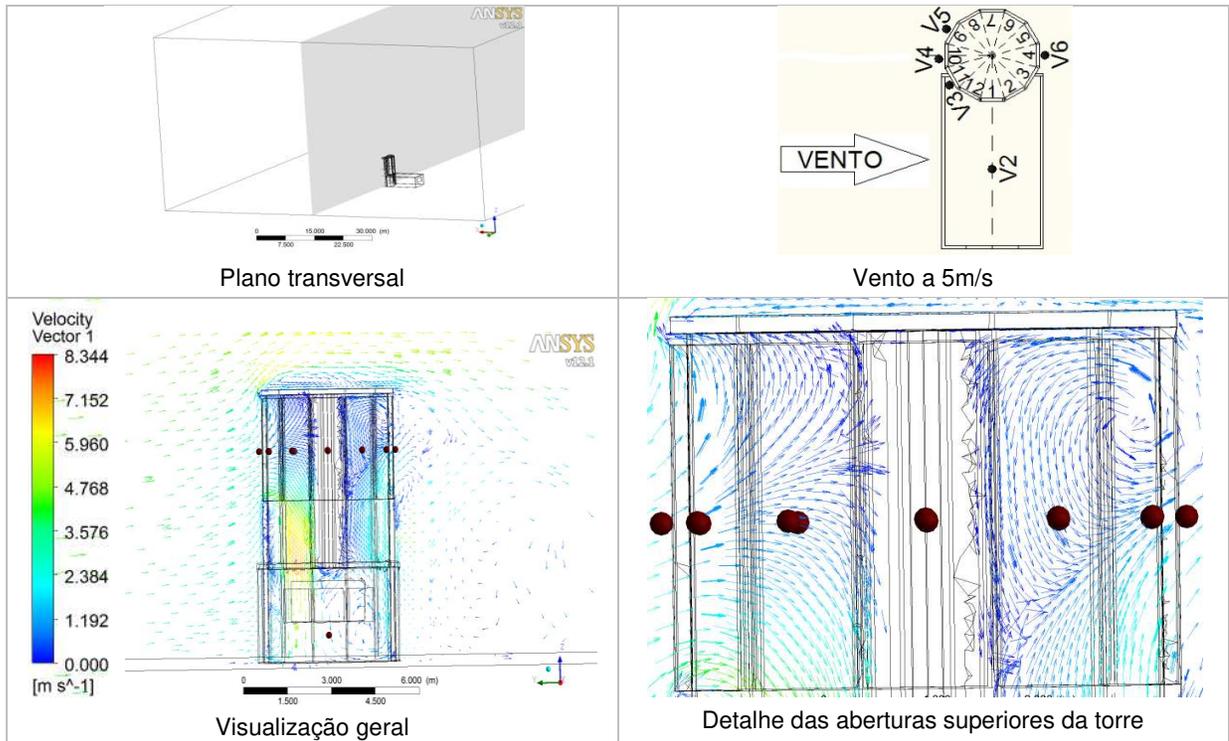
b)



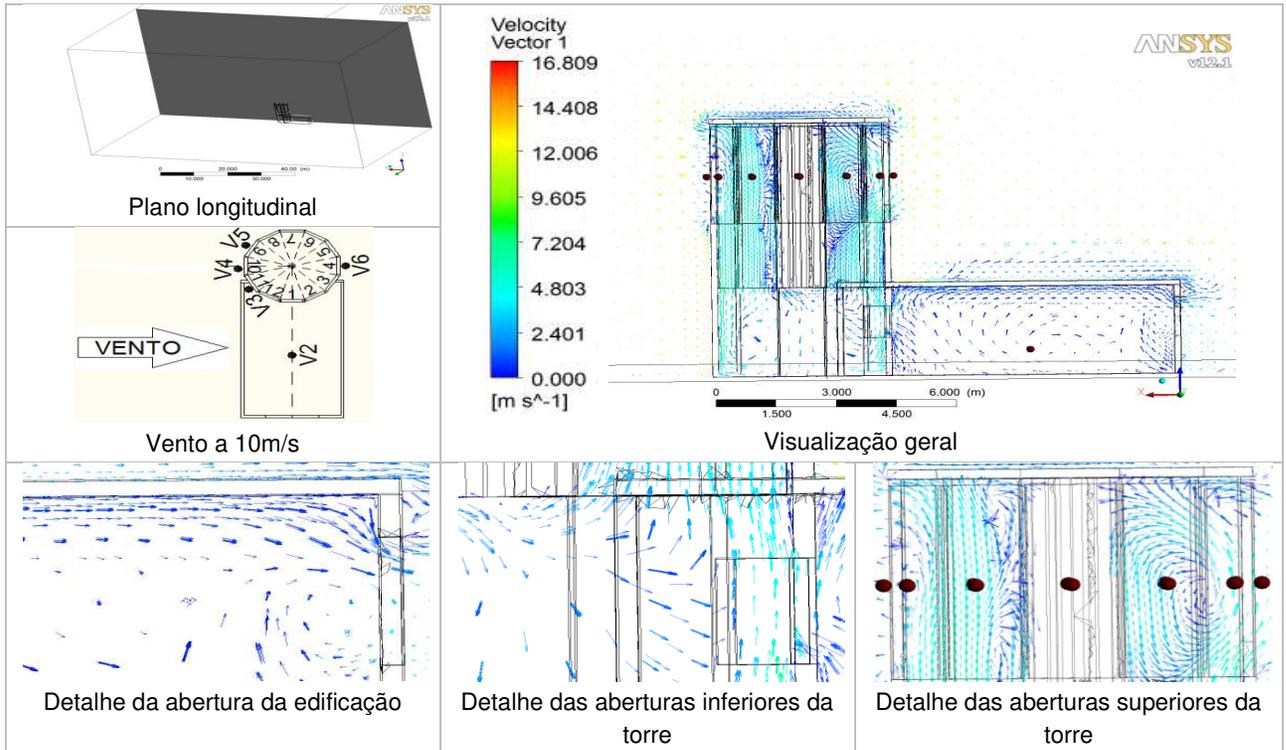
c)



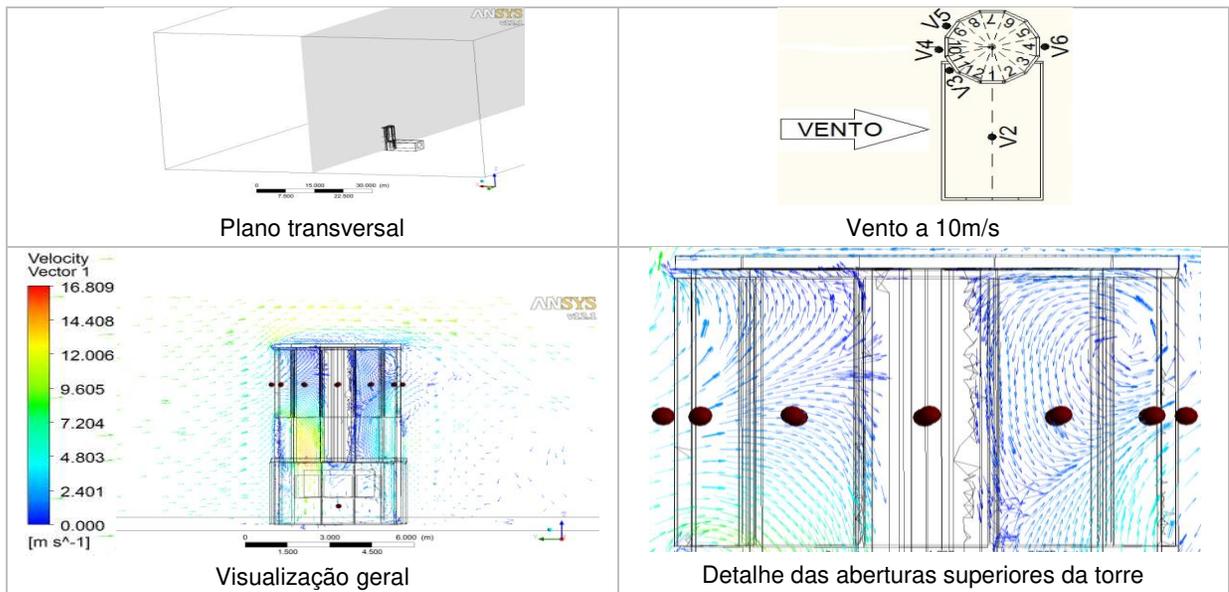
d)



e)



f)



V2 a V6: posições dos sensores de velocidade no modelo ensaiado no túnel de vento

1 a 12: posições das aberturas da torre

● : posições dos pontos onde foram simuladas as velocidades no software CFX®

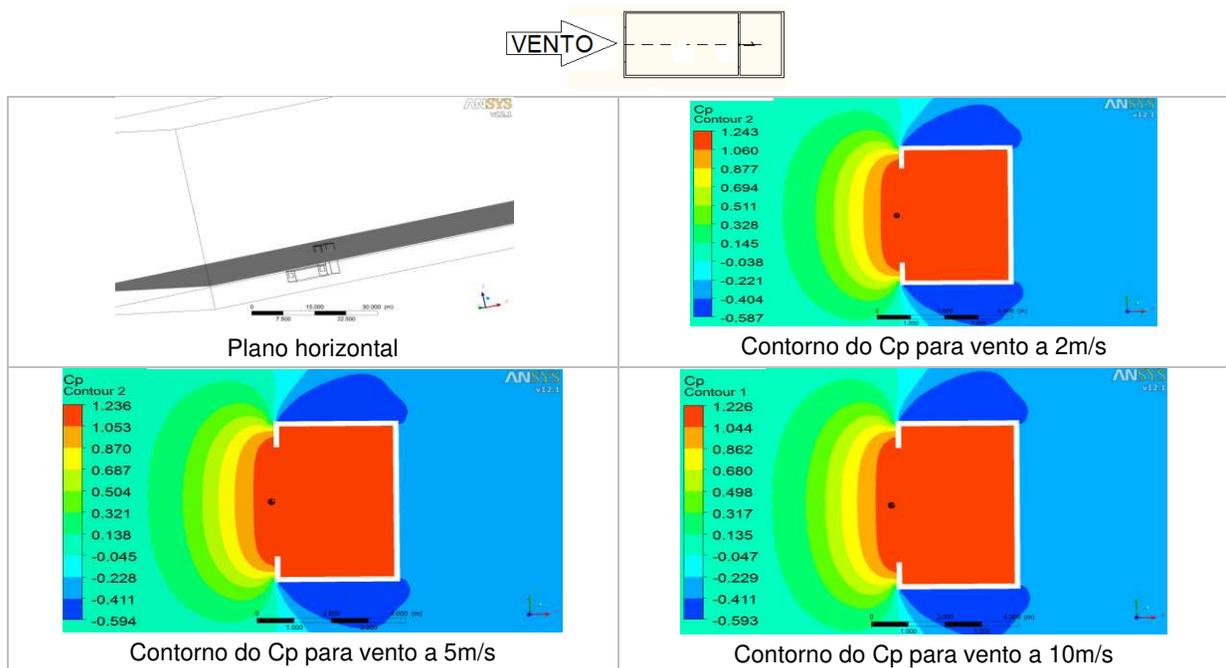
Figura 4.24 a, b, c, d, e, f: Vetores de velocidade do vento para a torre dodecadirecional a 270°

Em todos os casos nota-se a recirculação do ar no lado oposto da face que fica perpendicular ao vento, cuja explicação para isso é a turbulência gerada na face de saída do ar do domínio. Verifica-se, também, que não existe simetria em relação aos valores das posições de 90° e 270° nas quatro torres simuladas, pois em alguns casos o ar ficou concentrado nas aberturas superiores da torre e em outros nas aberturas inferiores da torre ou da edificação.

b) Simulações de pressão

Os valores das pressões computadas nas simulações realizadas no software CFX® permitiram calcular o coeficiente de pressão (C_p), utilizando uma fórmula inserida no CFX Post® (Anexo), cujos valores encontram-se representados nas figuras de 4.25 a 4.40, e, as imagens de contorno de pressão, no Apêndice B.

Na torre unidirecional a 0°, para as três velocidades de ensaio (V_{f1} , V_{f2} e V_{f3}), os valores dos coeficientes de pressão diminuem à medida que aumenta a velocidade do ar (figura 4.25).

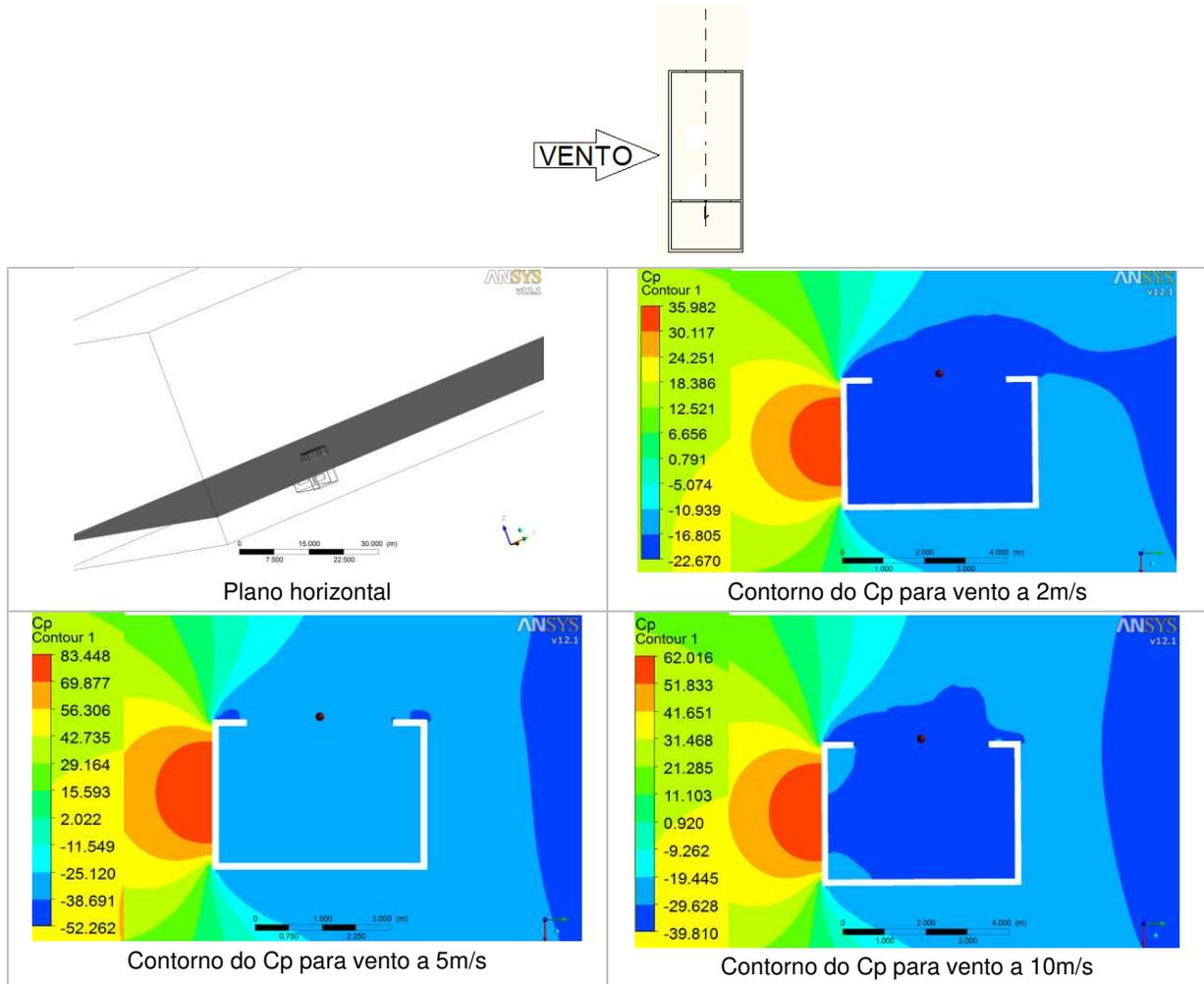


1: abertura da torre onde foi calculado o coeficiente de pressão no ensaio no túnel de vento

● : posição do ponto onde foi simulado o coeficiente de pressão no software CFX®

Figura 4.25: Contornos do coeficiente de pressão para a torre unidirecional a 0°

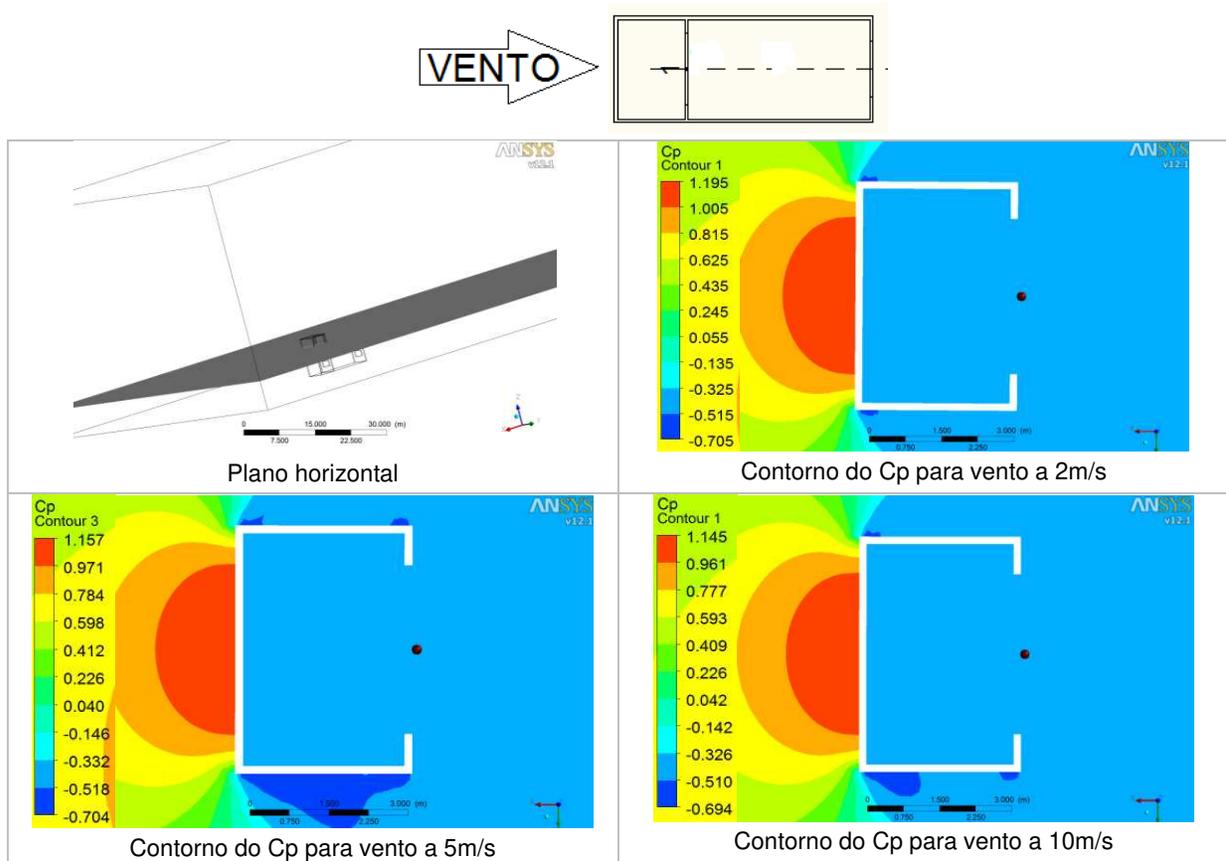
Considerando a torre unidirecional a 90°, para a velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}), o valor do coeficiente de pressão é menor que o da velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) (figura 4.26).



1: abertura da torre onde foi calculado o coeficiente de pressão no ensaio no túnel de vento
 ● : posição do ponto onde foi simulado o coeficiente de pressão no software CFX®

Figura 4.26: Contornos do coeficiente de pressão para a torre unidirecional a 90°

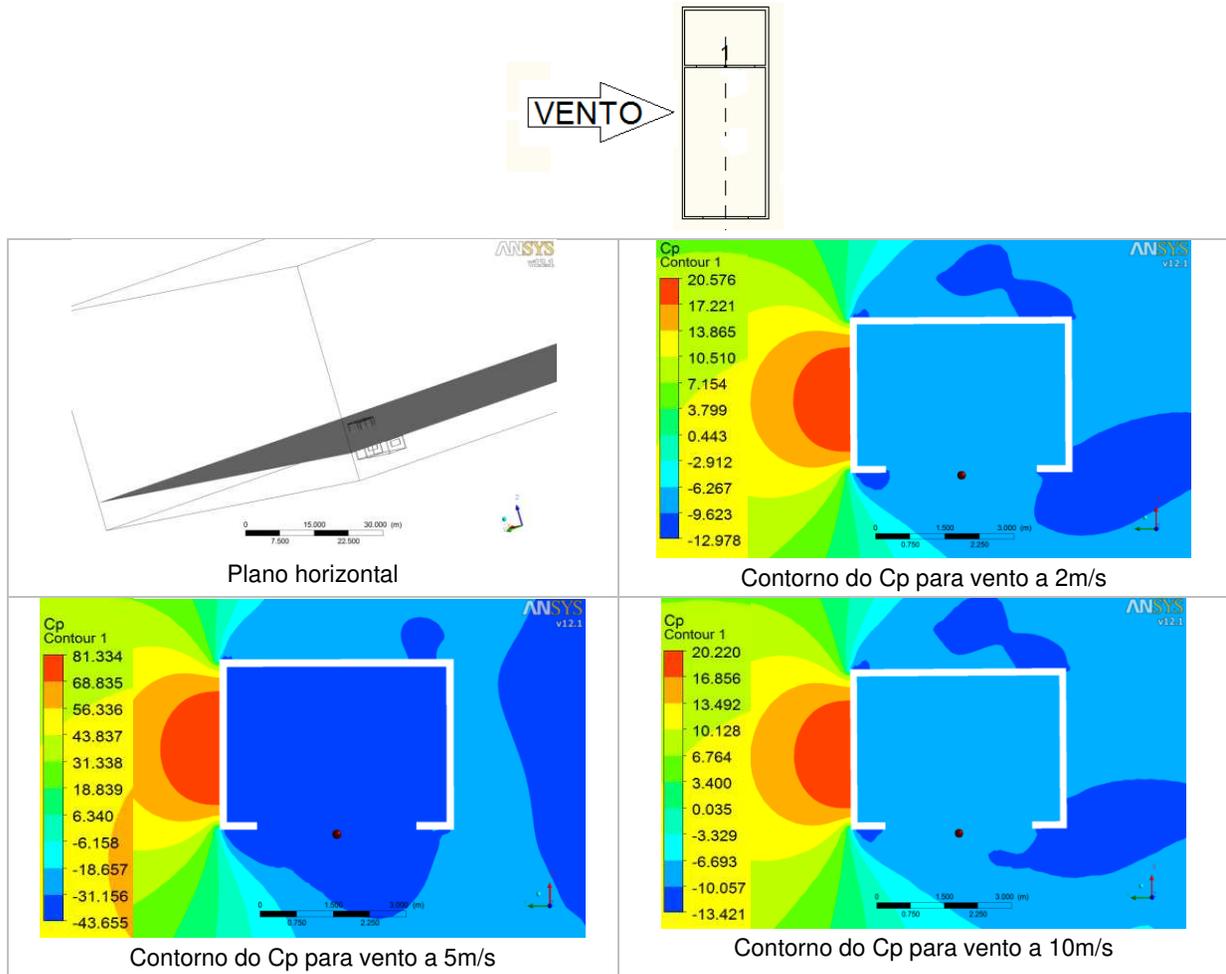
Na torre unidirecional a 180° ocorre um caso semelhante ao da posição de 90° (figura 4.27).



1: abertura da torre onde foi calculado o coeficiente de pressão no ensaio no túnel de vento
 ● : posição do ponto onde foi simulado o coeficiente de pressão no software CFX®

Figura 4.27: Contornos do coeficiente de pressão para a torre unidirecional a 180°

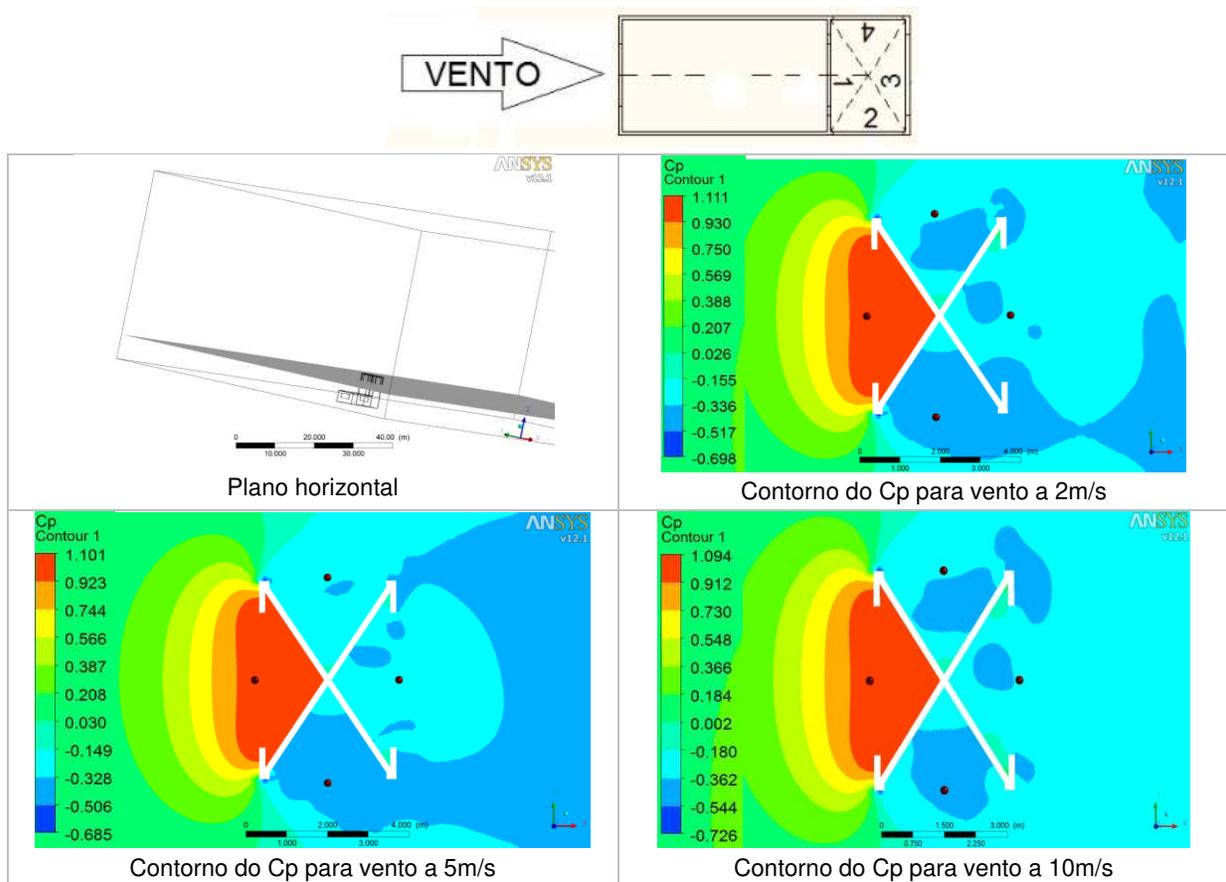
Analisando a torre unidirecional a 270°, o valor do coeficiente de pressão para a velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}) é bem maior que os das outras velocidades de ensaio (V_{f1} e V_{f3}) (figura 4.28).



1: abertura da torre onde foi calculado o coeficiente de pressão no ensaio no túnel de vento
 : posição do ponto onde foi medido o coeficiente de pressão no software CFX®

Figura 4.28: Contornos do coeficiente de pressão para a torre unidirecional a 270°

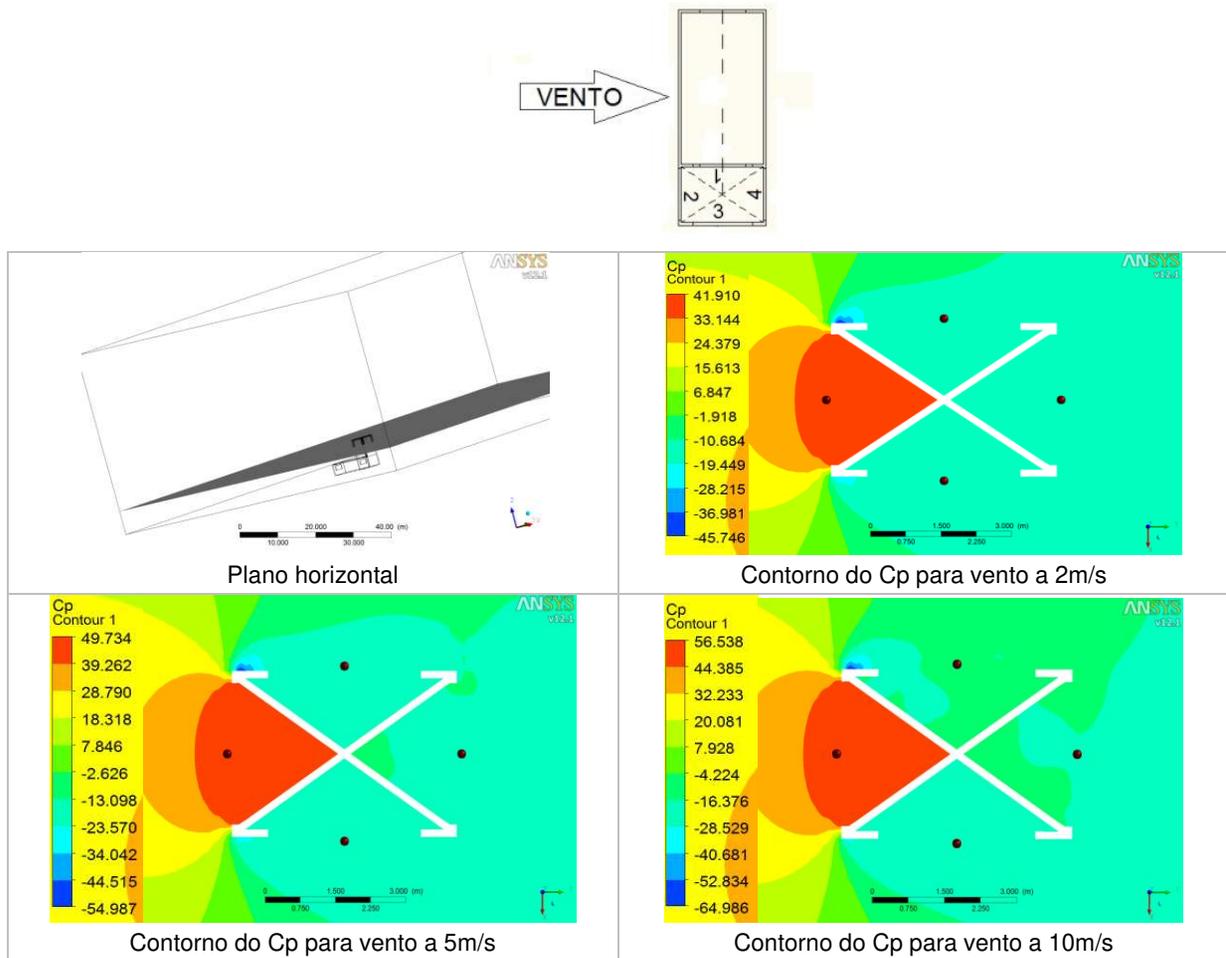
Na torre tetradirecional a 0°, os valores dos coeficientes de pressão da abertura 1 (Cp1) diminuem com o aumento da velocidade do ar, mas os coeficientes de pressão das demais aberturas (Cp2, Cp3 e Cp4) apresentam valores maiores para a velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}) (figura 4.29).



1 a 4: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.29: Contornos do coeficiente de pressão para a torre tetradirecional a 0°

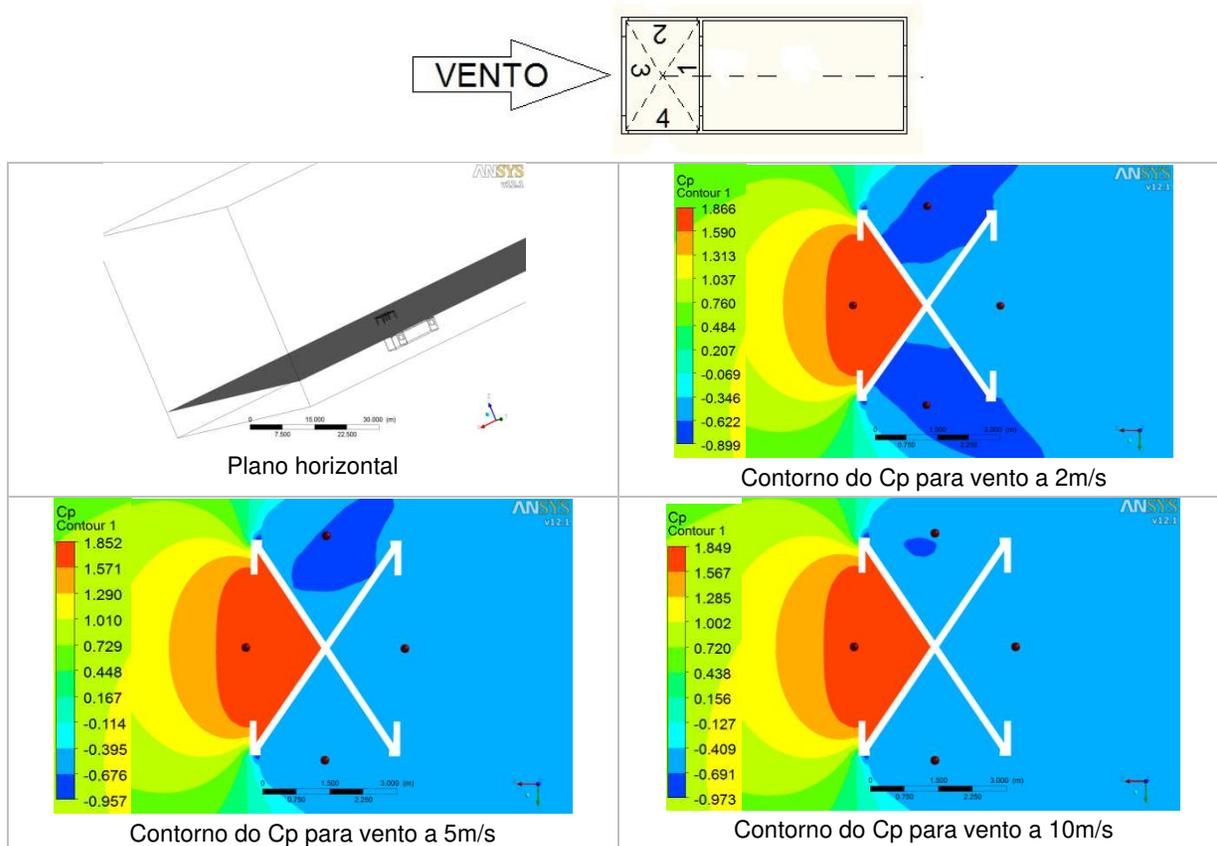
Considerando a torre tetradirecional a 90°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 3 e 4 (C_{p1} , C_{p3} e C_{p4}) diminuem à medida que a velocidade do ar aumenta, porém os coeficientes de pressão da abertura 2 (C_{p2}) aumentam com a elevação dos valores das velocidades de ensaio (figura 4.30).



1 a 4: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.30: Contornos do coeficiente de pressão para a torre tetradirecional a 90°

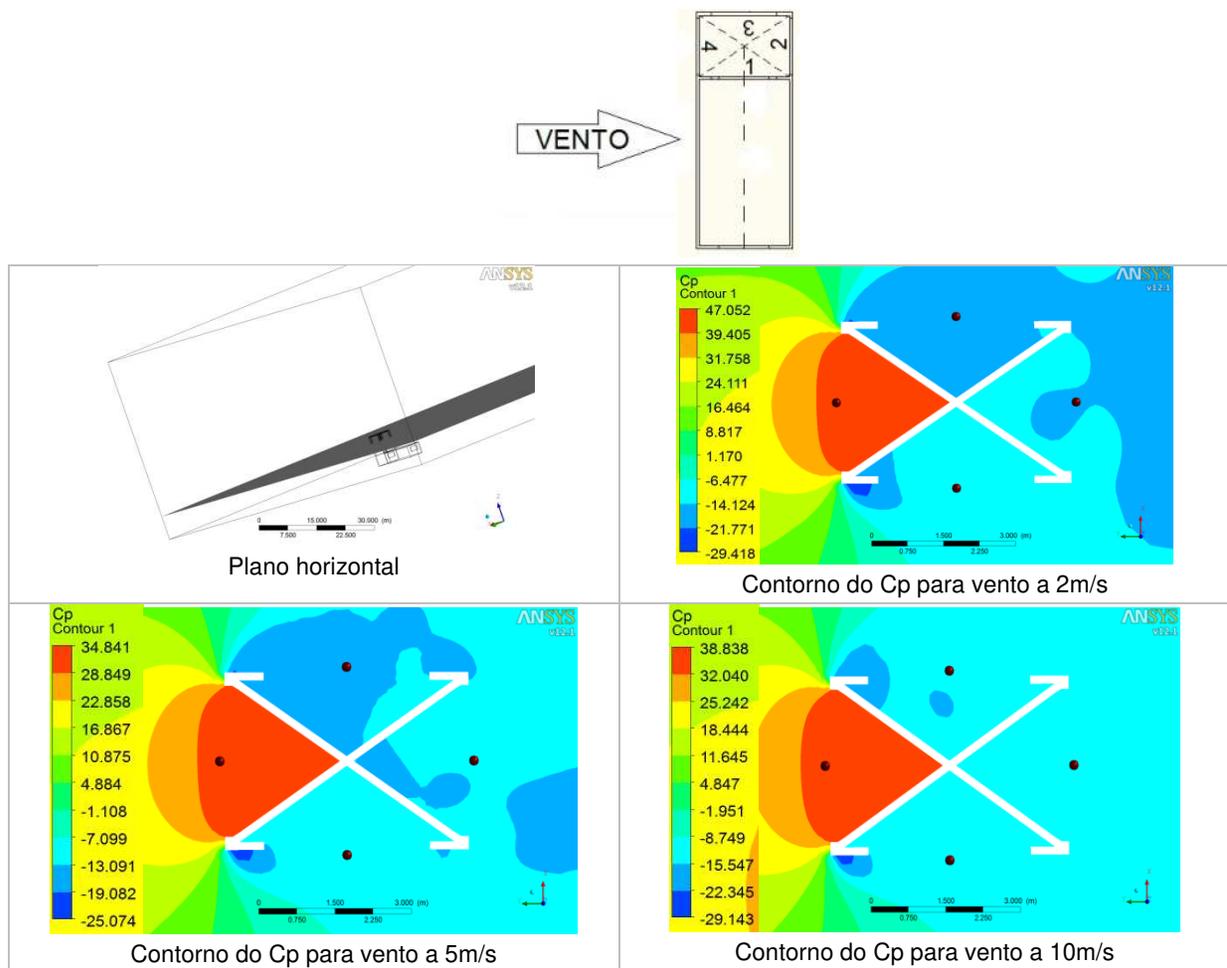
Na torre tetradirecional a 180°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1 e 3 (Cp1 e Cp3) diminuem com o aumento das velocidades de ensaio, mas os coeficientes de pressão das aberturas 2 e 4 (Cp2 e Cp4) possuem valores maiores para a velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) quando comparados a V_{f2} (5m/s) (figura 4.31).



1 a 4: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.31: Contornos do coeficiente de pressão para a torre tetradirecional a 180°

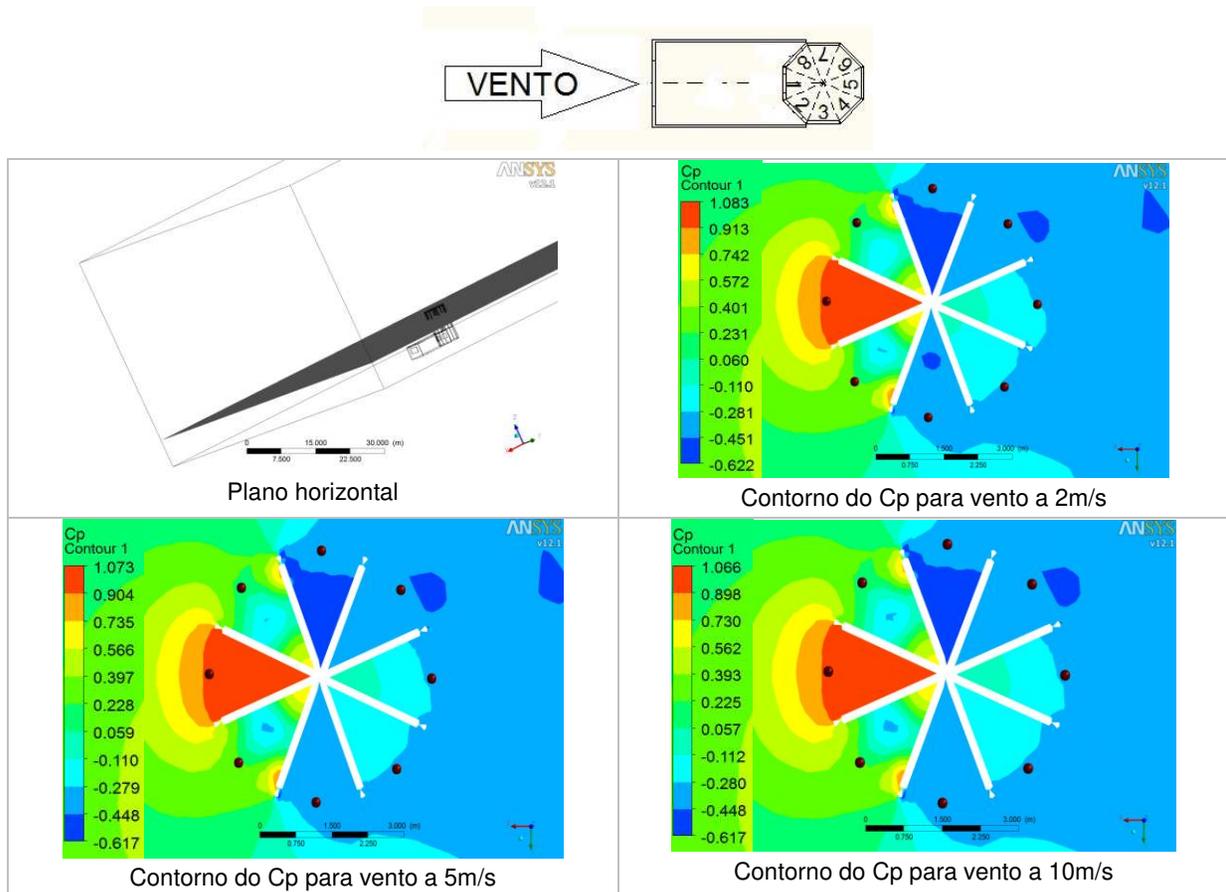
Analisando a torre tetradirecional a 270°, todos os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 3 e 4 (C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} e C_{p4}) apresentam um aumento à medida que ocorre o crescimento dos valores das velocidades de ensaio (V_{f1} , V_{f2} e V_{f3}) (figura 4.32).



1 a 4: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.32: Contornos do coeficiente de pressão para a torre tetradirecional a 270°

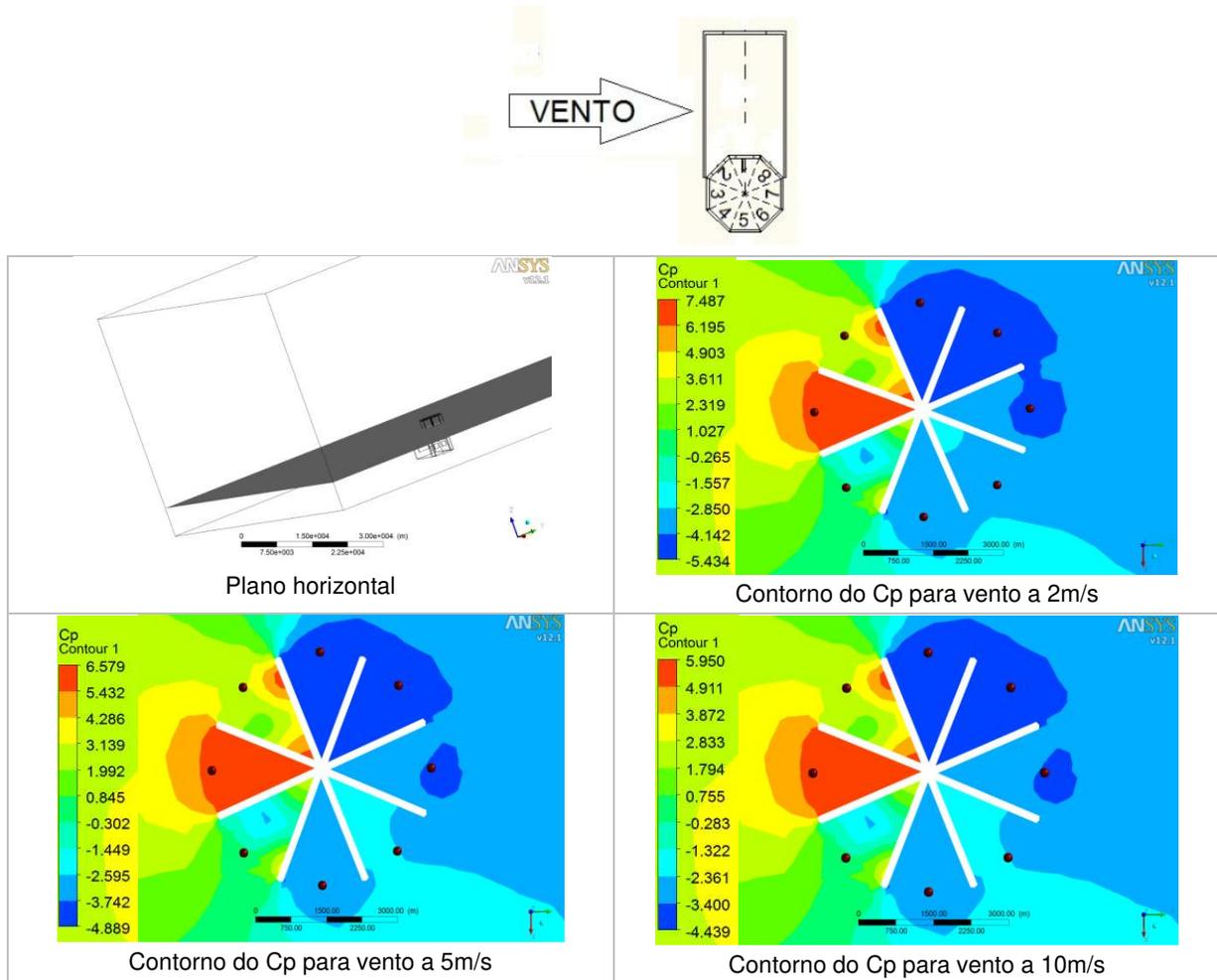
Na torre octodirecional a 0°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 3, 4, 5 e 8 (Cp1, Cp2, Cp3, Cp4, Cp5 e Cp8) diminuem com o crescimento das velocidades de ensaio, mas entre os coeficientes de pressão da abertura 6 (Cp6) o da velocidade de ensaio de 2m/s (V_{f1}) apresenta menor valor, e, na abertura 7 (Cp7) esses coeficientes aumentam à medida que os valores das velocidades de ensaio se elevam (figura 4.33).



1 a 8: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.33: Contornos do coeficiente de pressão para a torre octodirecional a 0°

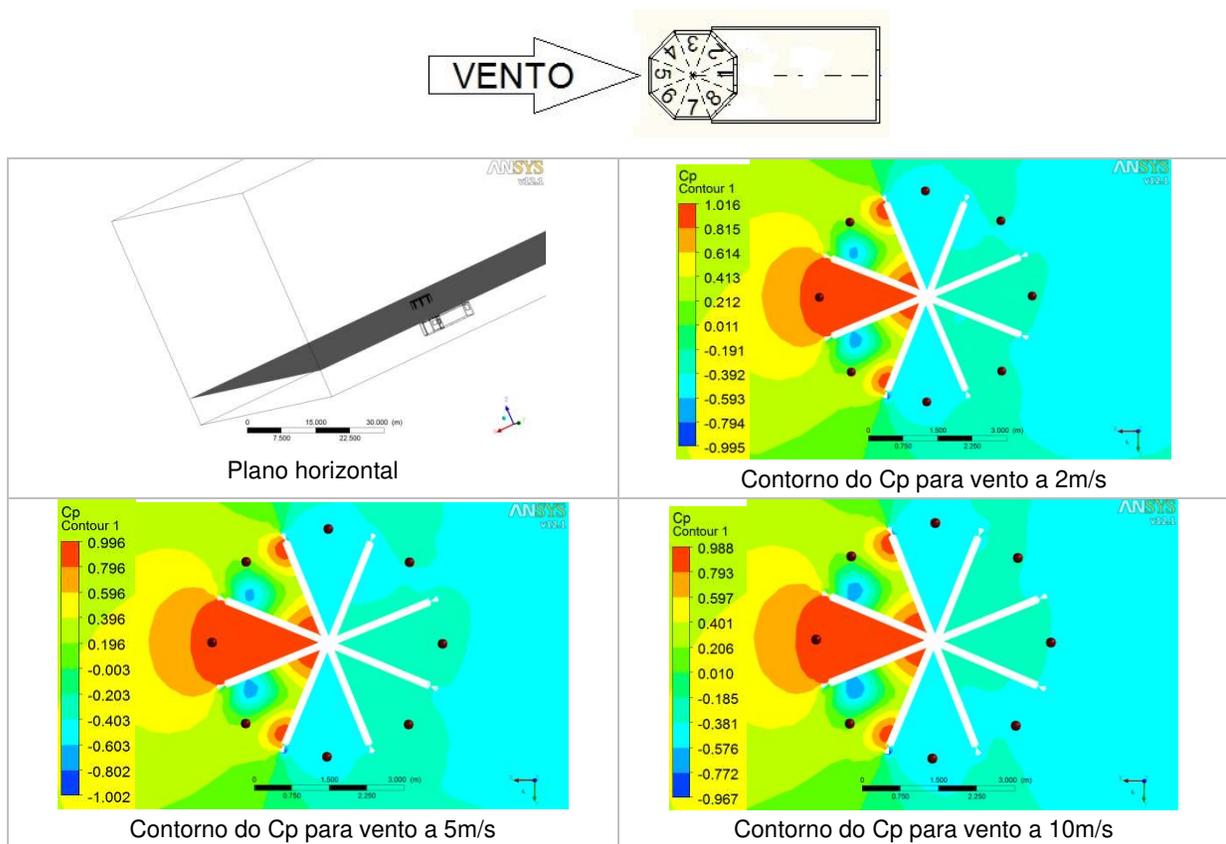
Considerando a torre octodirecional a 90°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 2, 3 e 4 (C_{p2} , C_{p3} e C_{p4}) diminuem com o aumento das velocidades de ensaio, porém os coeficientes de pressão das aberturas 1, 5, 6, 7 e 8 (C_{p1} , C_{p5} , C_{p6} , C_{p7} e C_{p8}) aumentam com o crescimento das velocidades de ensaio (figura 4.34).



1 a 8: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.34: Contornos do coeficiente de pressão para a torre octodirecional a 90°

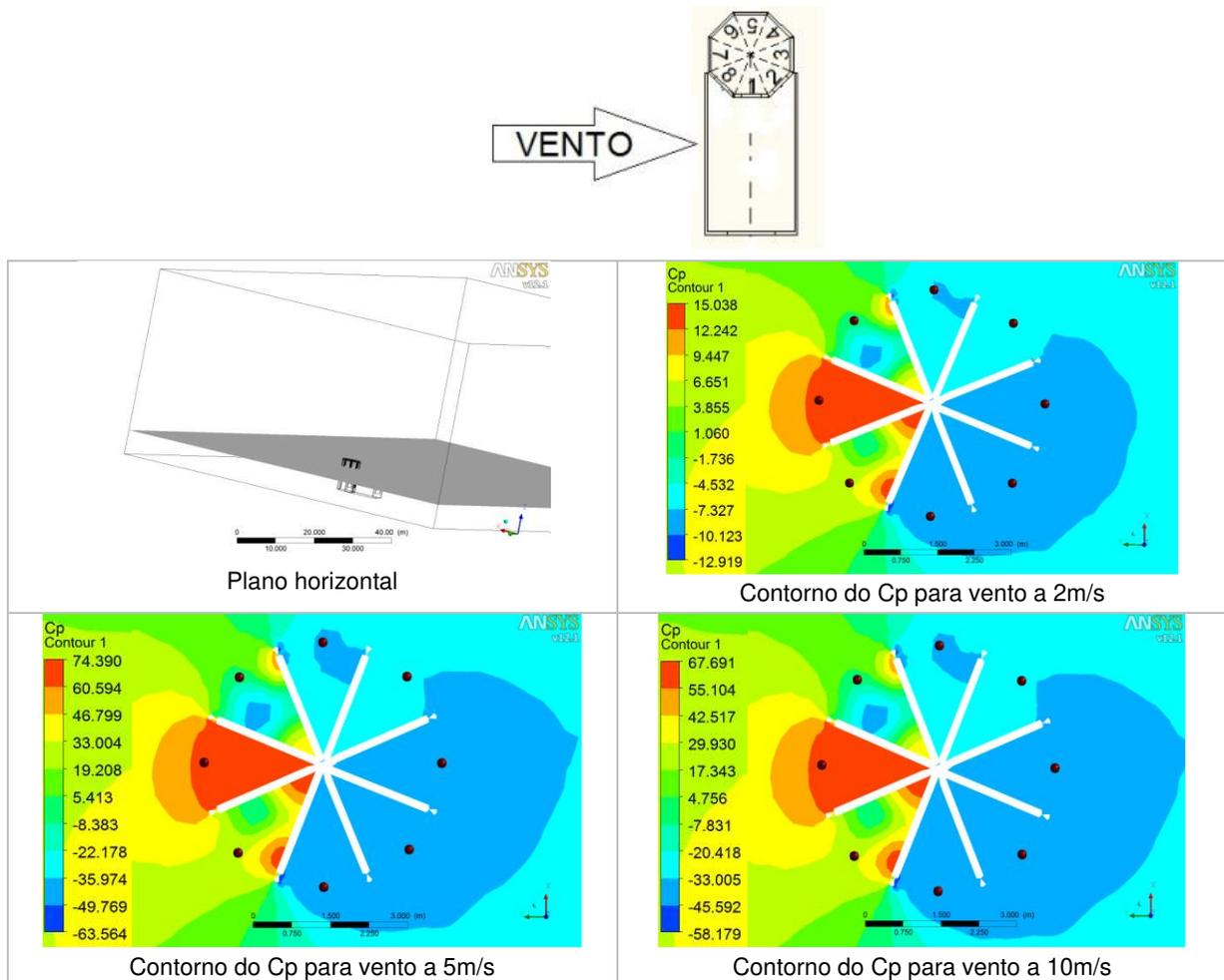
Na torre octodirecional a 180°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (Cp1, Cp3, Cp4, Cp5, Cp6 e Cp8) diminuem à medida que ocorre o crescimento da velocidade de ensaio, mas entre os coeficientes de pressão das aberturas 2 (Cp2) e 7 (Cp7) apresentam maiores valores para as velocidades de ensaio de 10m/s (V_{f3}) e de 5m/s (V_{f2}) respectivamente (figura 4.35).



1 a 8: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.35: Contornos do coeficiente de pressão para a torre octodirecional a 180°

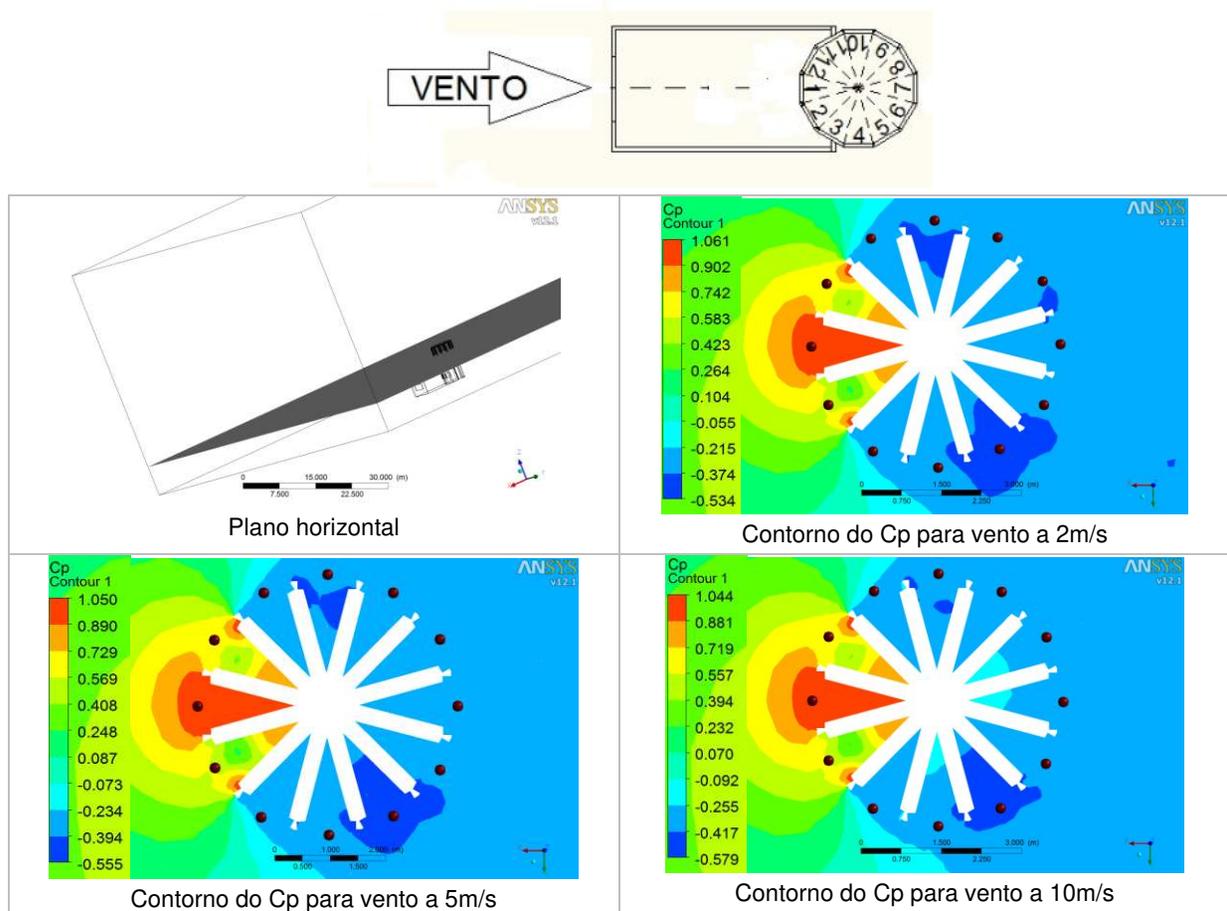
Analisando a torre octodirecional a 270°, os valores dos coeficientes de pressão da abertura 6 (Cp6) diminuem com o aumento das velocidades de ensaio, todavia os coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 3, 4 e 5 (Cp1, Cp2, Cp3, Cp4 e Cp5) apresentam valores maiores para a velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) quando comparados à de 5m/s (V_{f2}), e, nas aberturas 7 e 8 (Cp7 e Cp8) o coeficiente de pressão na velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}) tem o valor mais alto (figura 4.36).



1 a 8: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.36: Contornos do coeficiente de pressão para a torre octodirecional a 270°

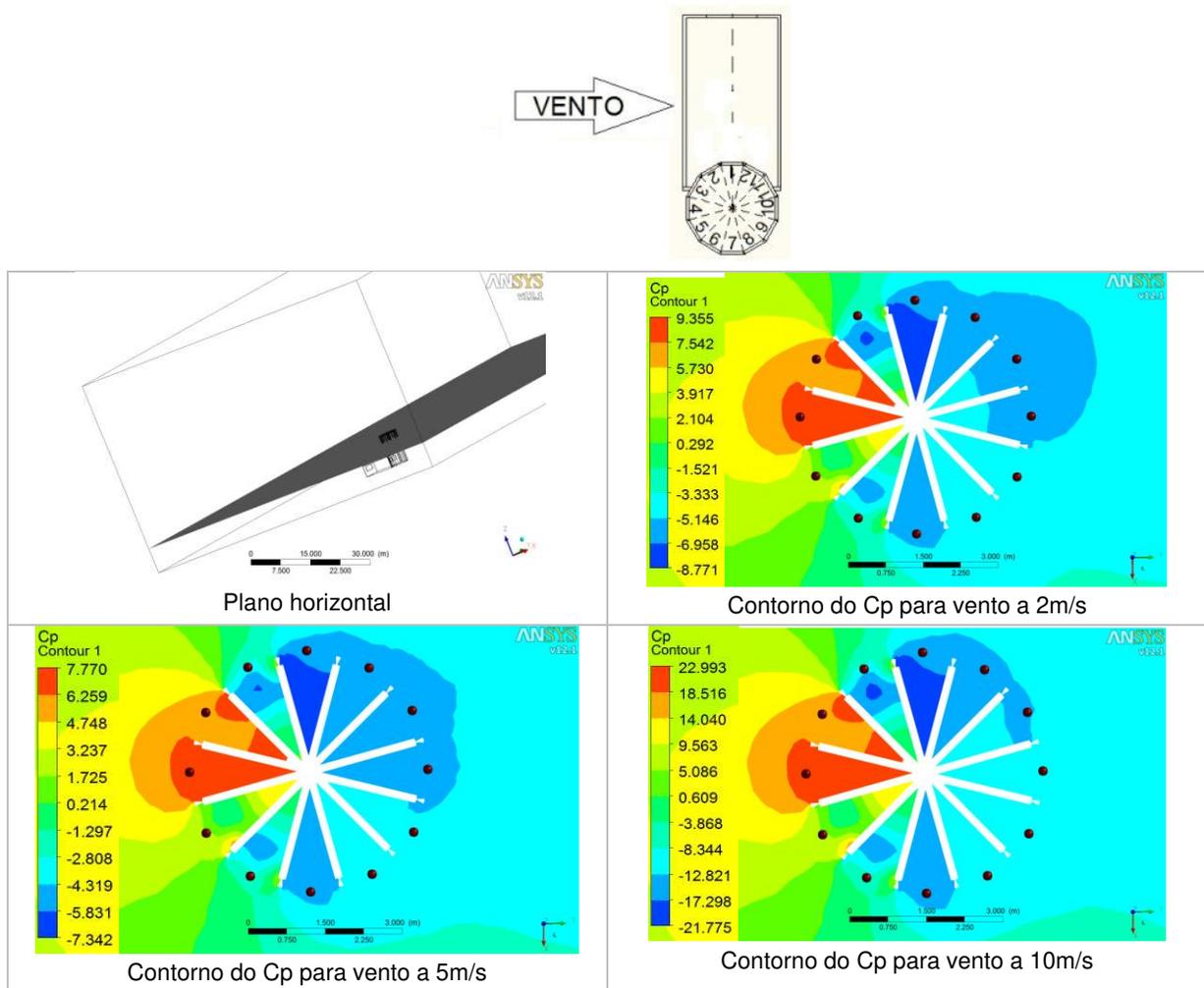
Na torre dodecadirecional a 0° , os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 4, 6, 10 e 12 (C_{p1} , C_{p2} , C_{p4} , C_{p6} , C_{p10} e C_{p12}) diminuem com o crescimento das velocidades de ensaio, porém os coeficientes de pressão das aberturas 3 e 8 (C_{p3} e C_{p8}) apresentam valores maiores para a velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}), e, de 10m/s (V_{f3}) nas aberturas 7 e 11 (C_{p7} e C_{p11}), na abertura 5 (C_{p5}) os coeficientes de pressão aumentam na elevação das velocidades de ensaio, e, na abertura 9 (C_{p9}) o coeficiente de pressão é maior para a velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) quando comparado à de 5m/s (V_{f2}) (figura 4.37).



1 a 12: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.37: Contornos do coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional a 0°

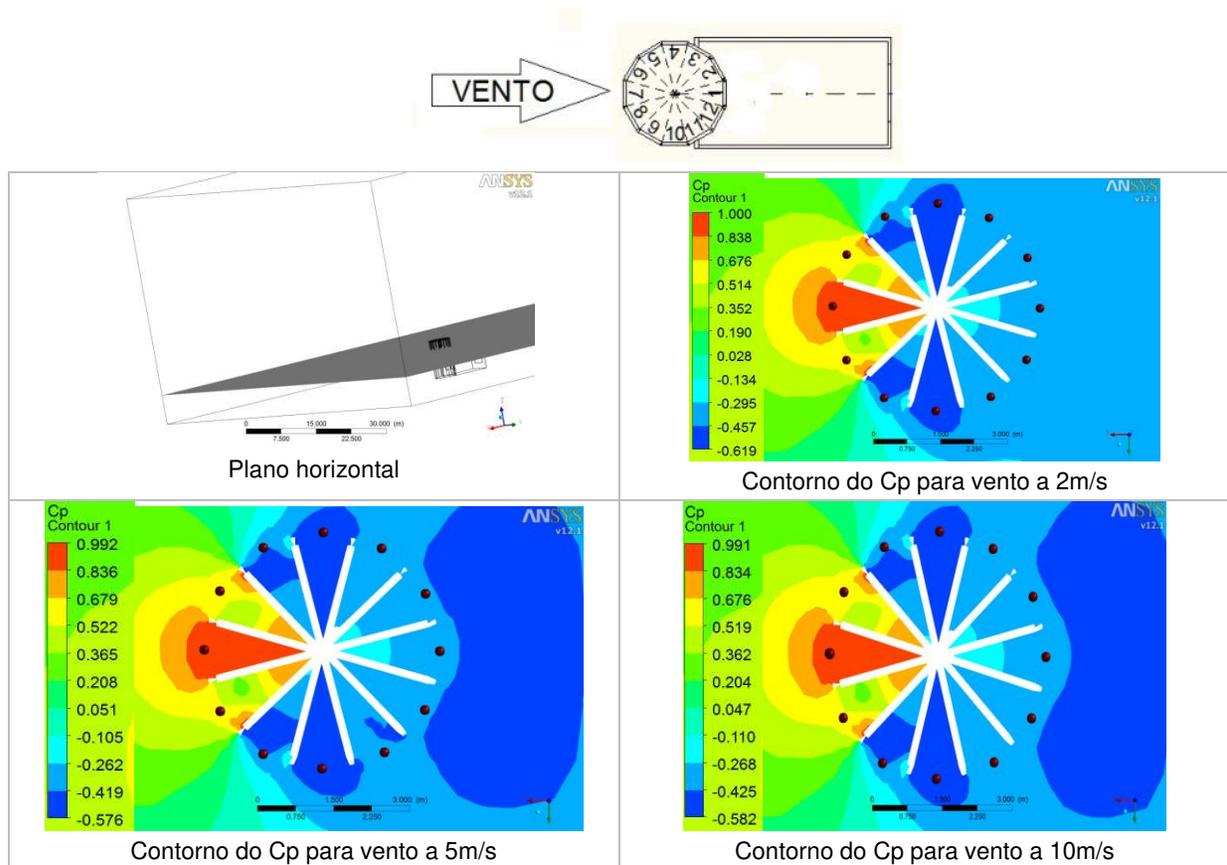
Considerando a torre dodecadirecional a 90°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 (Cp1, Cp2, Cp6, Cp7, Cp8, Cp9, Cp10, Cp11 e Cp12) possuem valores maiores para a velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}), e, os das aberturas 3, 4 e 5 (Cp3, Cp4 e Cp5) apresentam valores mais altos para a velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) (figura 4.38).



1 a 12: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.38: Contornos do coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional a 90°

Na torre dodecadirecional a 180°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 7 e 8 (Cp7 e Cp8) diminuem com o crescimento das velocidades de ensaio, mas os coeficientes de pressão das aberturas 1, 2, 4, 5, e 6 (Cp1, Cp2, Cp4, Cp5 e Cp6) aumentam com a elevação dessas velocidades, e, o coeficiente de pressão das aberturas 3, 9 e 10 (Cp3, Cp9 e Cp10) na velocidade de ensaio de 5m/s (V_{f2}) tem o maior valor, assim como o das aberturas 11 e 12 (Cp11 e Cp12) apresenta grande valor para a velocidade de ensaio de 10m/s (V_{f3}) quando comparado à de 5m/s (V_{f2}) (figura 4.39).

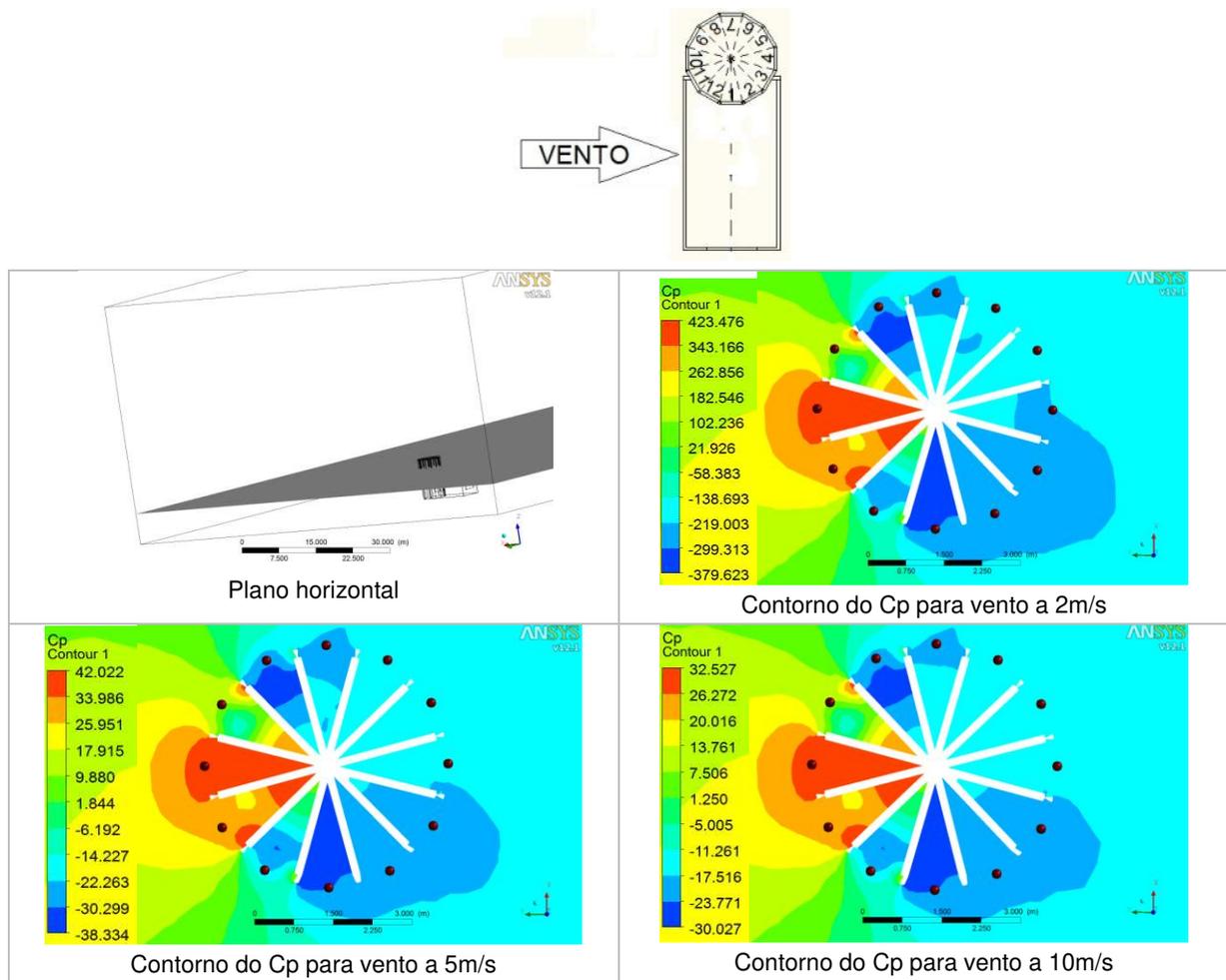


1 a 12: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento

● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.39: Contornos do coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional a 180°

Analisando a torre dodecadirecional a 270°, os valores dos coeficientes de pressão das aberturas 9, 10 e 11 (Cp9, Cp10 e Cp11) diminuem com o crescimento das velocidades de ensaio, ao contrário dos coeficientes de pressão das demais aberturas (Cp1, Cp2, Cp3, Cp4, Cp5, Cp6, Cp7, Cp8 e Cp12), os quais aumentam com a elevação dessas velocidades (figura 4.40).



1 a 12: aberturas da torre onde foram calculados os coeficientes de pressão nos ensaios no túnel de vento
 ● : posições dos pontos onde foram simulados os coeficientes de pressão no software CFX®

Figura 4.40: Contornos do coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional a 270°

Para as quatro torres simuladas, nas três diferentes velocidades ($V_{f1}=2\text{m/s}$, $V_{f2}=5\text{m/s}$ e $V_{f3}=10\text{m/s}$), é observado que os maiores pontos de pressão e, conseqüentemente, os maiores coeficientes de pressão situam-se na mesma direção do vento, os quais diminuem à medida que se distanciam de sua ação.

Considerando os valores de coeficientes de pressão, dependentes da velocidade do vento, verifica-se que esses tem uma relação inversa a essas velocidades, isto é, para velocidades altas (maiores ou iguais a 1m/s), quanto maior a velocidade menor o coeficiente de pressão, e, para velocidades baixas (menores que 1m/s), quanto menor a velocidade maior o coeficiente de pressão. Entretanto, há casos em que isso não ocorre, nas quais, provavelmente a pressão de referência (PR), é menor ou maior, dependendo do caso, que a pressão no ponto considerado para o cálculo (Anexo).

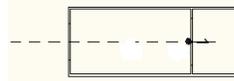
c) Relação entre os valores do coeficiente de pressão e de velocidade na ventilação da edificação

Nas tabelas 4.6 a 4.10 mostram-se os sinais dos coeficientes de pressão (C_p) para cada velocidade simulada no software CFX[®], os quais indicam barlavento, quando a torre funciona como captador (C_p positivo), ou sota-vento, quando a torre atua como extrator (C_p negativo), ocorrendo ambos sistemas para uma mesma posição em torres com mais de uma abertura.

Analisando-se os valores mostrados nessas tabelas observa-se que as torres possuem coeficientes de pressão negativos na maior parte das posições. Todavia, como a abordagem dessa pesquisa é sobre captadores, então serão considerados apenas os C_p s positivos.

Considerando as quatro posições simuladas, na torre unidirecional, percebe-se que apenas na posição de 0° o C_p é positivo para todas as velocidades consideradas, e, estando suas aberturas numa posição favorável a entrada do vento, apresenta os maiores valores de velocidade do ar interno à edificação (V_2), promovendo assim a melhor ventilação (tabela 4.6).

Tabela 4.6: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) na abertura da torre unidirecional



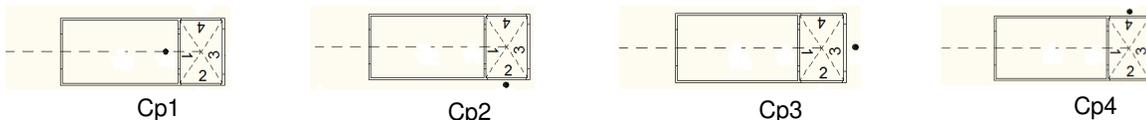
Ponto da simulação de pressão

Velocidades X Posições	Cp		
	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}
0°	+	+	+
90°	-	-	-
180°	-	-	-
270°	-	-	-

Cp: Coeficiente de pressão na abertura/ Velocidades: V_{f1}=2m/s, V_{f2}=5m/s e V_{f3}=10m/s

Para as quatro posições simuladas, na torre tetradirecional, observa-se que cada posição apresenta o mesmo número de Cp positivo para as três velocidades simuladas como consequência da posição da abertura em relação à direção do vento, mas é a posição de 0° que apresenta os maiores valores de velocidade do ar no interior da edificação (V₂), oferecendo uma ventilação eficiente (tabela 4.7).

Tabela 4.7: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre tetradirecional



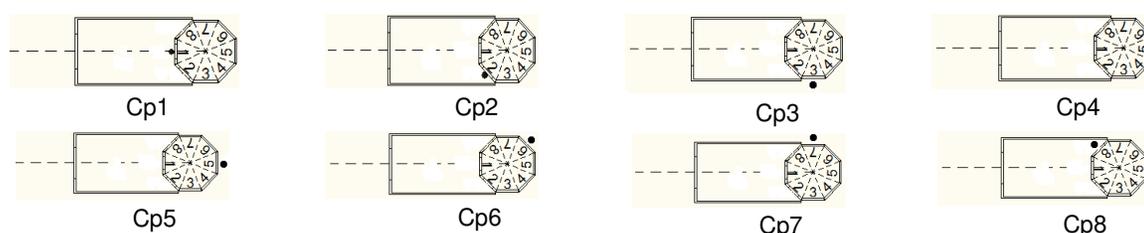
Pontos da simulação de pressão

Velocidades X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4		
	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}
0°	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90°	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
180°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
270°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Velocidades: V_{f1}=2m/s, V_{f2}=5m/s e V_{f3}=10m/s

Analisando os Cps positivos para as três velocidades simuladas, na torre octodirecional, verifica-se que as posições de 0°, 90° e 180° possuem os maiores e os mesmos números desses Cps, sendo semelhante à tetradirecional em relação à posição e direção do vento, inclusive é, também, a posição de 0° que apresenta os maiores valores de velocidade do ar interno à edificação (V2) (tabela 4.8).

Tabela 4.8: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre octodirecional



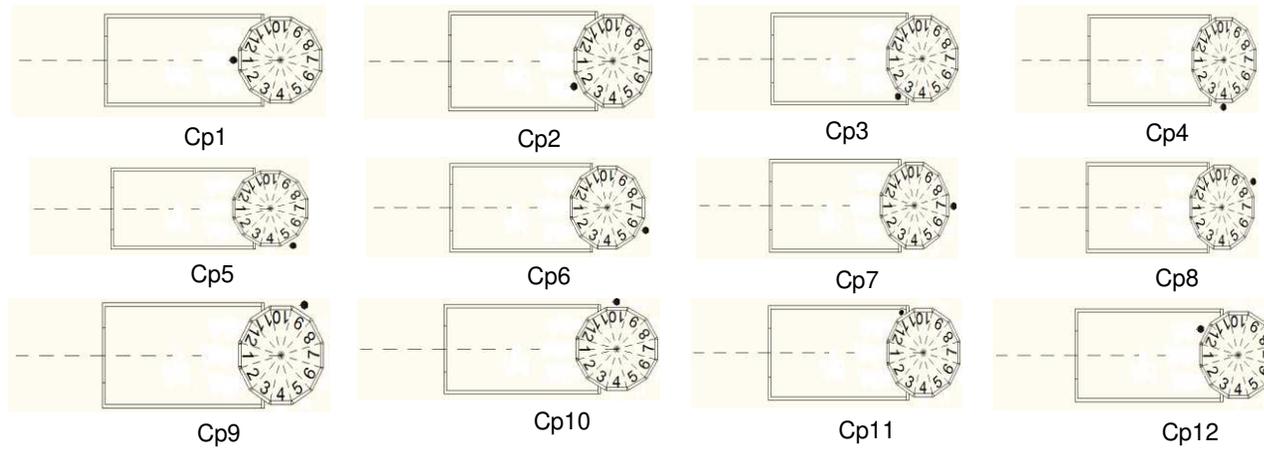
Pontos da simulação de pressão

Velocidades X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4			Cp5			Cp6			Cp7			Cp8		
	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}
0°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
90°	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
270°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Velocidades: V_{f1}=2m/s, V_{f2}=5m/s e V_{f3}=10m/s

As quatro posições da torre dodecadirecional, para as três velocidades simuladas, apresentam o mesmo número de Cps positivos, com semelhança à tetradirecional em relação à posição e direção do vento, porém os maiores valores de velocidade do ar no interior da edificação (V2) variam de acordo com a posição e velocidade simulada: 0° para V_{f1}, 90° para V_{f2} e 270° para V_{f3} (tabela 4.9).

Tabela 4.9: Sinais dos coeficientes de pressão (Cp) nas aberturas da torre dodecadirecional



Pontos da simulação de pressão

Velocidades X Posições	Cp1			Cp2			Cp3			Cp4			Cp5			Cp6			Cp7			Cp8			Cp9			Cp10			Cp11			Cp12		
	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}			
0°	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	
90°	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
180°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
270°	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-

Cp: Coeficientes de pressão nas aberturas/ Velocidades: V_{f1}=2m/s, V_{f2}=5m/s e V_{f3}=10m/s

Observando-se os valores de V_2 para cada torre (figuras 4.9 a 4.24) é verificado que a eficiência da ventilação no interior da edificação também está relacionada com a dimensão das aberturas da torre e a proximidade de suas divisórias, favorecendo ou dificultando a entrada do ar na torre.

A torre octodirecional, dentre as quatro torres analisadas, é a que apresenta o maior número de coeficientes de pressão (C_p) positivos (34%), ou seja, essa torre se destaca como captador quando comparada às demais (tabela 4.10). Entretanto, as torres octo e dodecadirecional são as que apresentam maiores valores de velocidade do ar interno (V_2), proporcionando uma maior troca de ar.

Tabela 4.10: Quantidade de coeficientes de pressão (C_p) nas torres analisadas

Sinais X Torres	+	+ (%)	-	- (%)	Total
Unidirecional	3	25	9	75	12
Tetradirecional	12	25	36	75	48
Octodirecional	33	34	63	66	96
Dodecadirecional	36	25	108	75	144

4.3. Comparação e diferenças entre os resultados dos ensaios no túnel de vento e das simulações no software CFX®

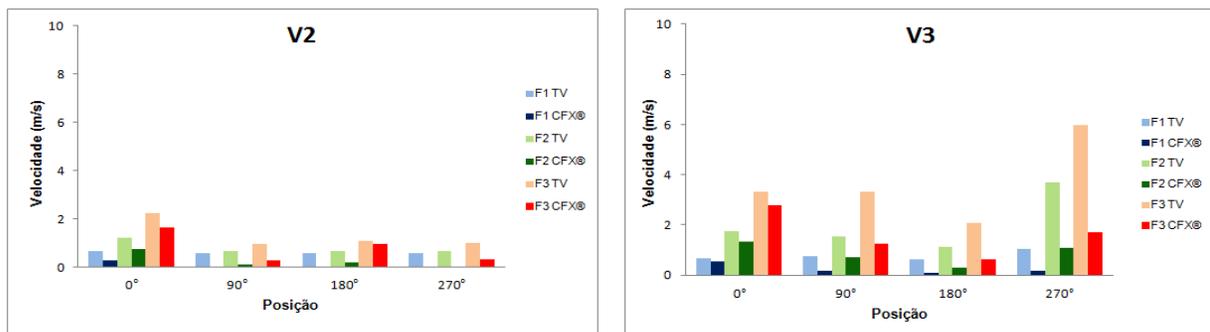
a) Velocidade

Nas figuras 4.41 a 4.48 representam-se a comparação e as diferenças entre os valores de velocidade do ar resultantes dos ensaios no túnel de vento e das simulações no software CFX®.

A torre unidirecional apresenta os valores da velocidade do ar interno à edificação (V2) maiores nos ensaios no túnel de vento, quando comparado às simulações no software CFX[®], fato que se torna intenso nas posições de 90°, 180° e 270°, as quais mostram os valores simulados próximos de 0m/s, principalmente tratando-se da velocidade de F1 (V_{f1}=2m/s). Quanto aos valores da velocidade do ar na abertura da torre (V3) percebe-se, também, que os valores determinados no túnel de vento são superiores aos da simulação no CFX[®], principalmente na posição de 270°, porém os valores simulados são maiores que dos do ar interno (V2) (figura 4.41).



Abertura da torre



V2: Velocidade do ar no interior da edificação / V3: Velocidade do ar na abertura da torre

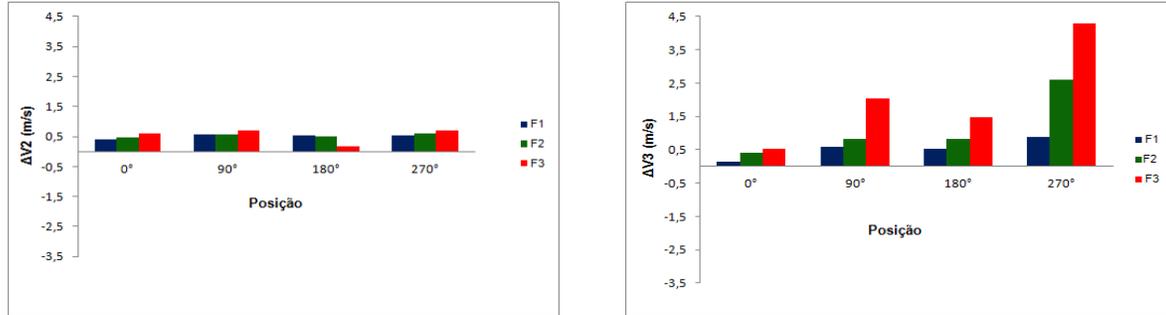
F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm

F1 CFX[®], F2 CFX[®], F3 CFX[®]: Velocidades simuladas no software CFX[®] correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.41: Comparação dos valores de velocidade do ar para a torre unidirecional

A torre unidirecional não apresenta grandes diferenças entre os dois métodos de determinação da velocidade do ar no interior da edificação (V2), destacando-se F3 (V_{f3}=10m/s) na posição de 180° que é muito inferior em relação às outras posições, mostrando grande aproximação entre os valores. Ao contrário da diferença dos valores do ar interno à edificação (ΔV_2), a diferença dos valores do ar na abertura da torre

($\Delta V3$) estão com grandes diferenças, notadamente na posição de 270° para as três frequências estudadas (figura 4.42).



$\Delta V2$: Diferença entre os valores de velocidade do ar no interior da edificação ($V_{2TV} - V_{2CFX}^{\text{®}}$)

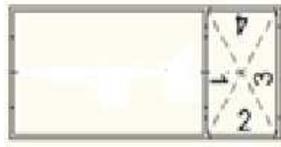
$\Delta V3$: Diferença entre os valores de velocidade do ar na abertura da torre ($V_{3TV} - V_{3CFX}^{\text{®}}$)

F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

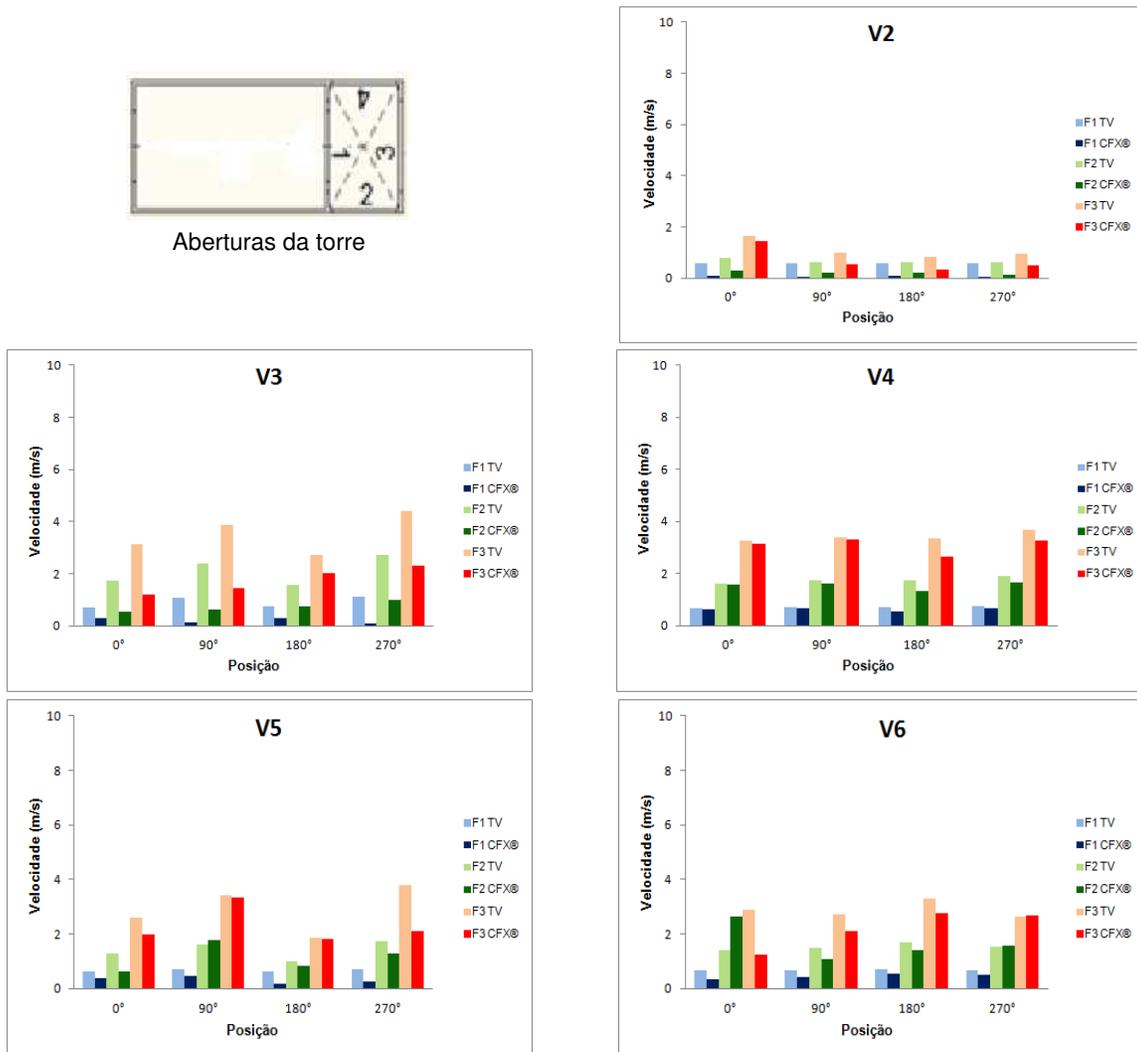
Figura 4.42: Diferenças dos valores de velocidade do ar para a torre unidirecional

Os valores da velocidade do ar interno da edificação ($V2$), da torre tetradirecional, nos ensaios de túnel de vento são elevados em comparação às simulações do CFX[®], cuja diferença é notável nas posições de 90° e 270° , onde os valores simulados encontram-se próximos de 0m/s para F1 ($V_{f1}=2\text{m/s}$). Considerando os valores da velocidade do ar nas aberturas dessa torre nota-se que embora os valores registrados no túnel de vento sejam maiores que os das simulações no CFX[®], há casos em que os valores dos dois métodos se igualam, como nas posições de 0° e 90° , aberturas 1 e 2 respectivamente, 90° para a abertura 1 e 270° para a abertura 2 (figura 4.43).

As diferenças entre os dois métodos na determinação da velocidade do ar da torre tetradirecional não apresentam grandes valores, distinguindo-se F3 ($V_{f3}=10\text{m/s}$) na posição de 0° para o ar no interior da edificação ($\Delta V2$), F1 ($V_{f1}=2\text{m/s}$), F2 ($V_{f2}=5\text{m/s}$) e F3 ($V_{f3}=10\text{m/s}$) nas posições de 0° e 90° para $\Delta V4$, F1 em 180° para $\Delta V5$ e F2 e F3 em 270° para $\Delta V6$, cujos valores estão muito próximos, ao contrário dos valores de $\Delta V3$ para todas as posições, os quais chegam a ultrapassar 2m/s (figura 4.44).

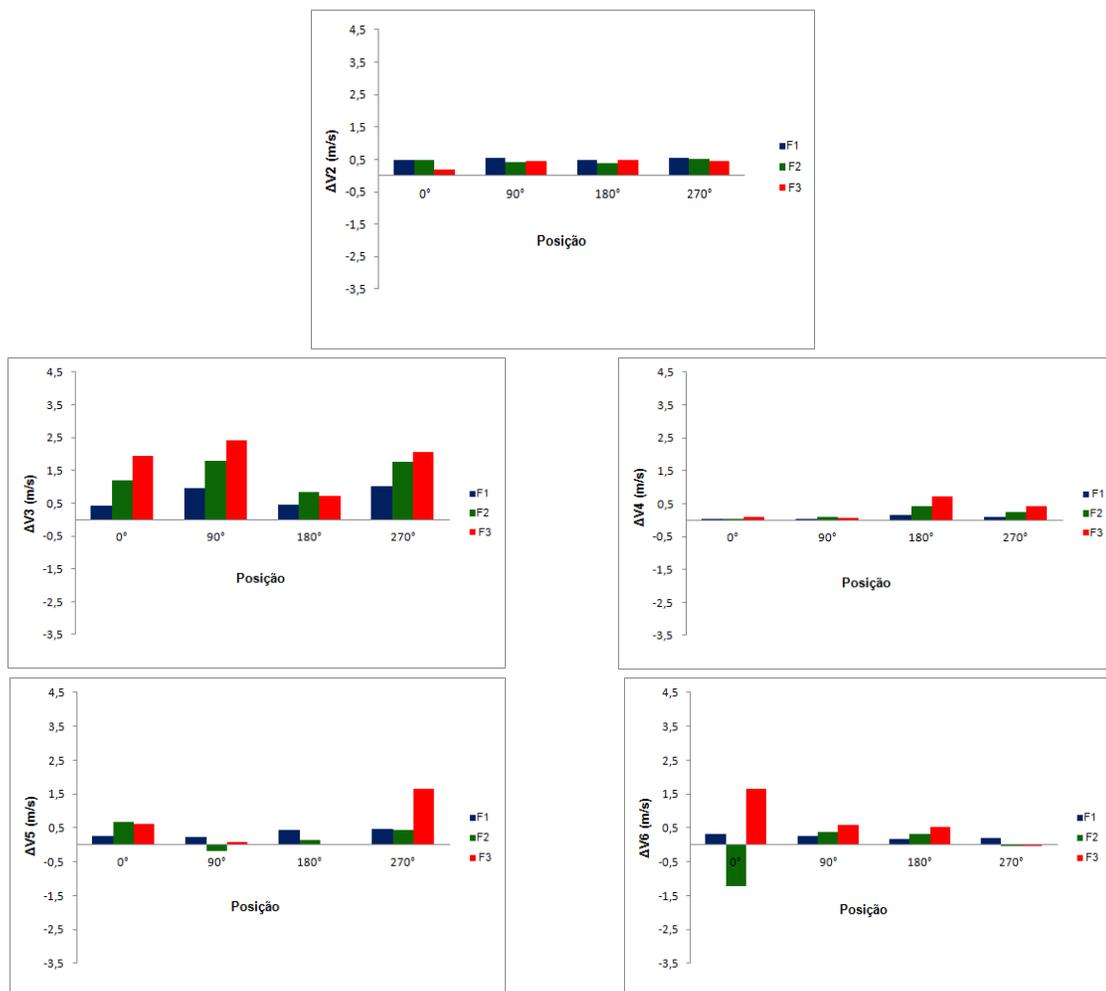


Aberturas da torre



V2: Velocidade do ar no interior da edificação / V3 a V6: Velocidades do ar nas aberturas da torre
 F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm
 F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.43: Comparação dos valores de velocidade do ar para a torre tetradirecional

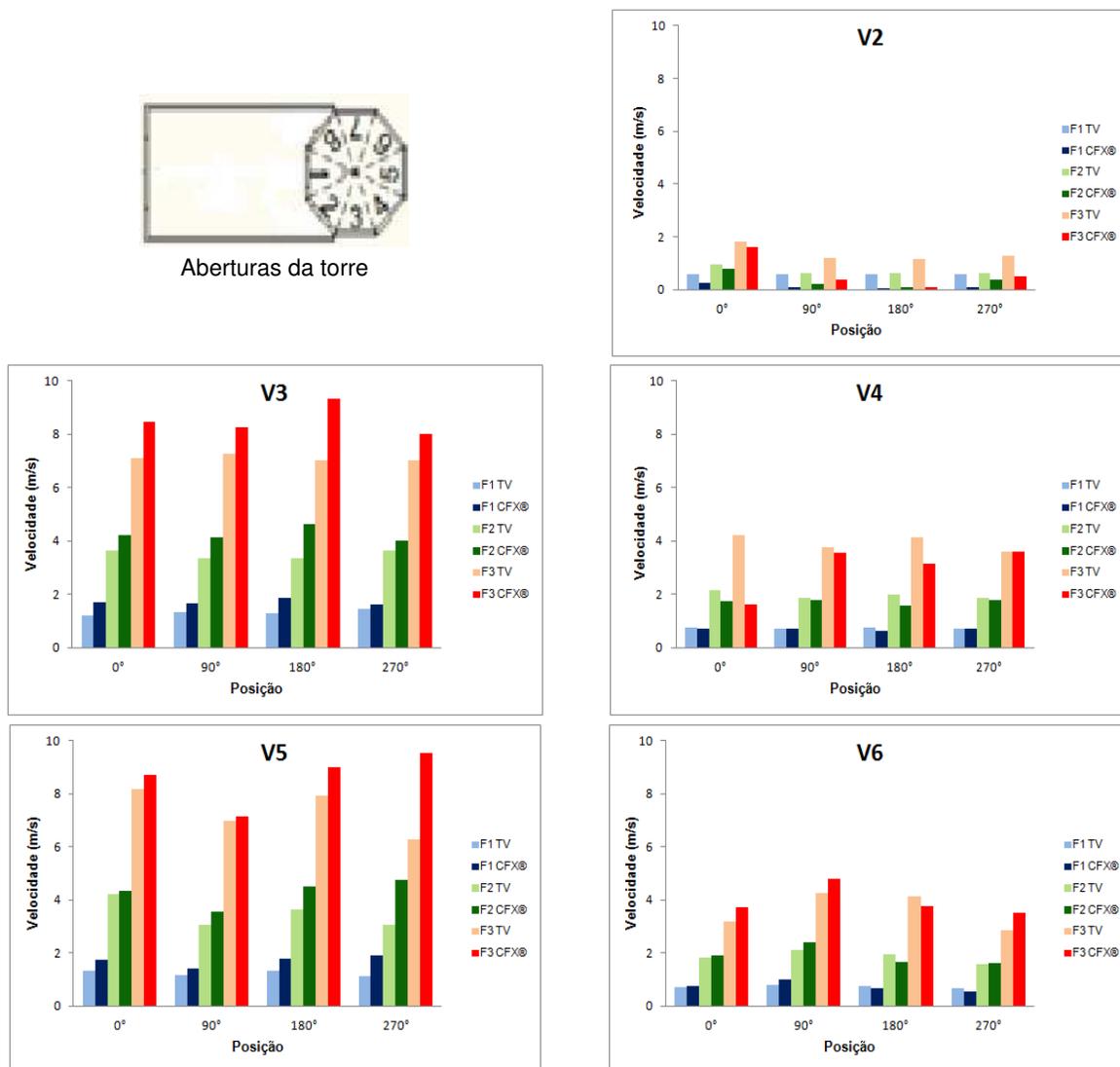


$\Delta V2$: Diferença entre os valores de velocidade do ar no interior da edificação ($V_{2TV} - V_{2CFX}^{\text{®}}$)
 $\Delta V3$ a $\Delta V6$: Diferenças entre os valores de velocidade do ar nas aberturas da torre ($V_{TV} - V_{CFX}^{\text{®}}$)
 F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.44: Diferenças dos valores de velocidade do ar para a torre tetradirecional

Na torre octodirecional observa-se que os valores da velocidade do ar interno à edificação ($V2$) obtidos nos ensaios do túnel de vento são superiores aos das simulações no software CFX[®], porém na posição de 0° os valores encontrados pelos dois métodos estão próximos, ao contrário da posição de 180°, na qual os valores simulados aproximam-se de 0m/s. Nas aberturas dessa torre é percebido que os valores da velocidade do ar são muito elevados para os dois métodos nas aberturas onde foram colocados os sensores V3 e V5, além disso, nesses dois casos os valores

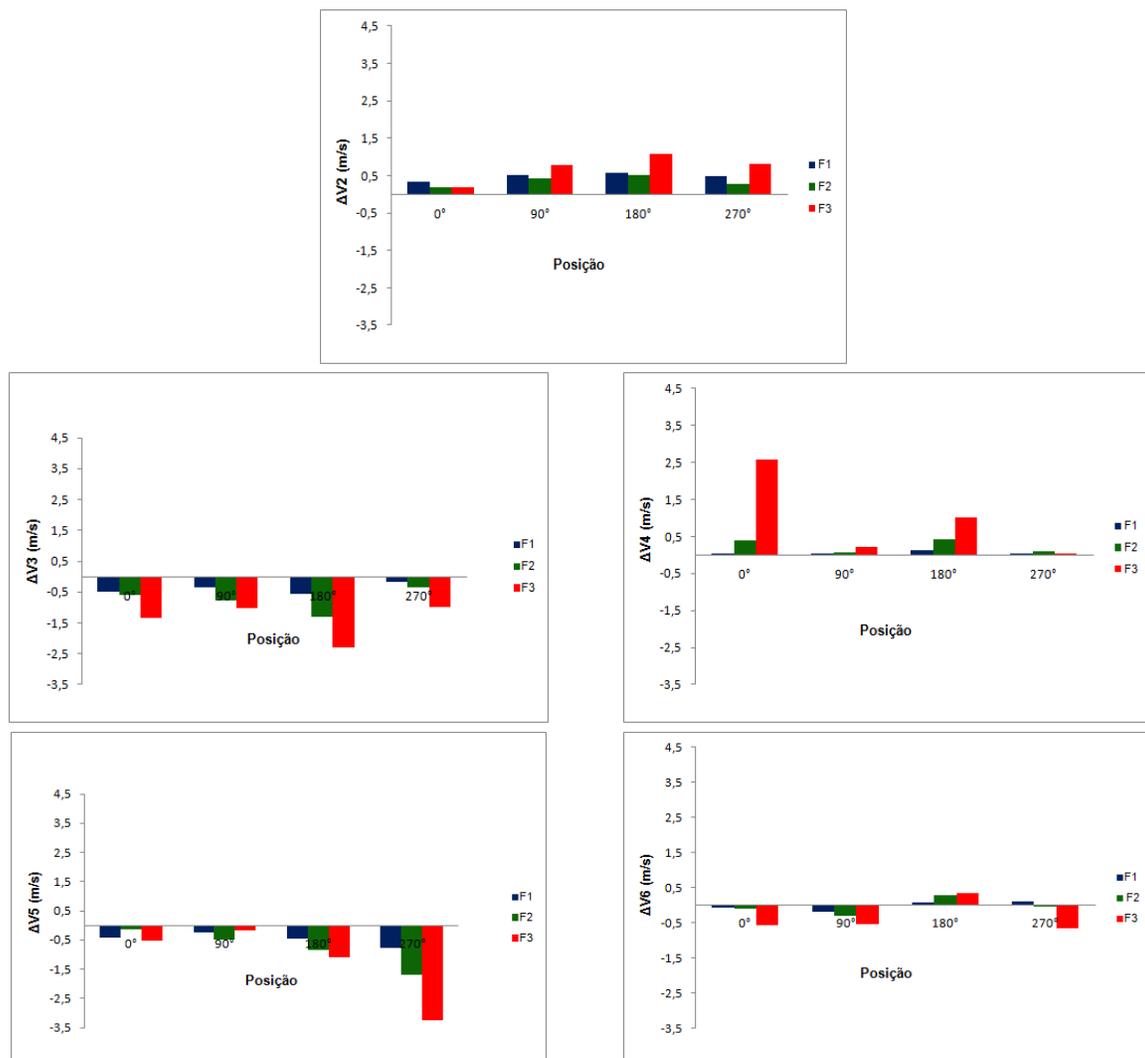
simulados são superiores aos ensaiados, o que não ocorreu com as torres uni e tetradirecional. Nas outras aberturas onde os valores são menores nota-se que os valores dos ensaios superam os simulados, mas nas posições de 90° e 270° em V4 e 0° e 270° em V6 os dois métodos aproximam-se para F1 ($V_{f1}=2\text{m/s}$) e F2 ($V_{f2}=5\text{m/s}$), e, F3 ($V_{f3}=10\text{m/s}$) para V4 (figura 4.45).



V2: Velocidade do ar no interior da edificação / V3 a V6: Velocidades do ar nas aberturas da torre
 F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm
 F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.45: Comparação dos valores de velocidade do ar para a torre octodirecional

A torre octodirecional não apresenta grandes diferenças entre os dois métodos na determinação da velocidade do ar, exceto para F3 na posição de 0° para $\Delta V4$ e 270° para $\Delta V5$, a qual ultrapassa 25m/s. Destacam-se as posições de 0° para F1, 90° para F1 e F2 e 270° para F1, F2 e F3 em $\Delta V4$, nas quais as diferenças são quase nulas, mostrando uma boa aproximação entre os dois métodos, ocorrendo o mesmo para F1 em 0° e 180°, e F2 em 0° e 270° para $\Delta V6$ (figura 4.46).



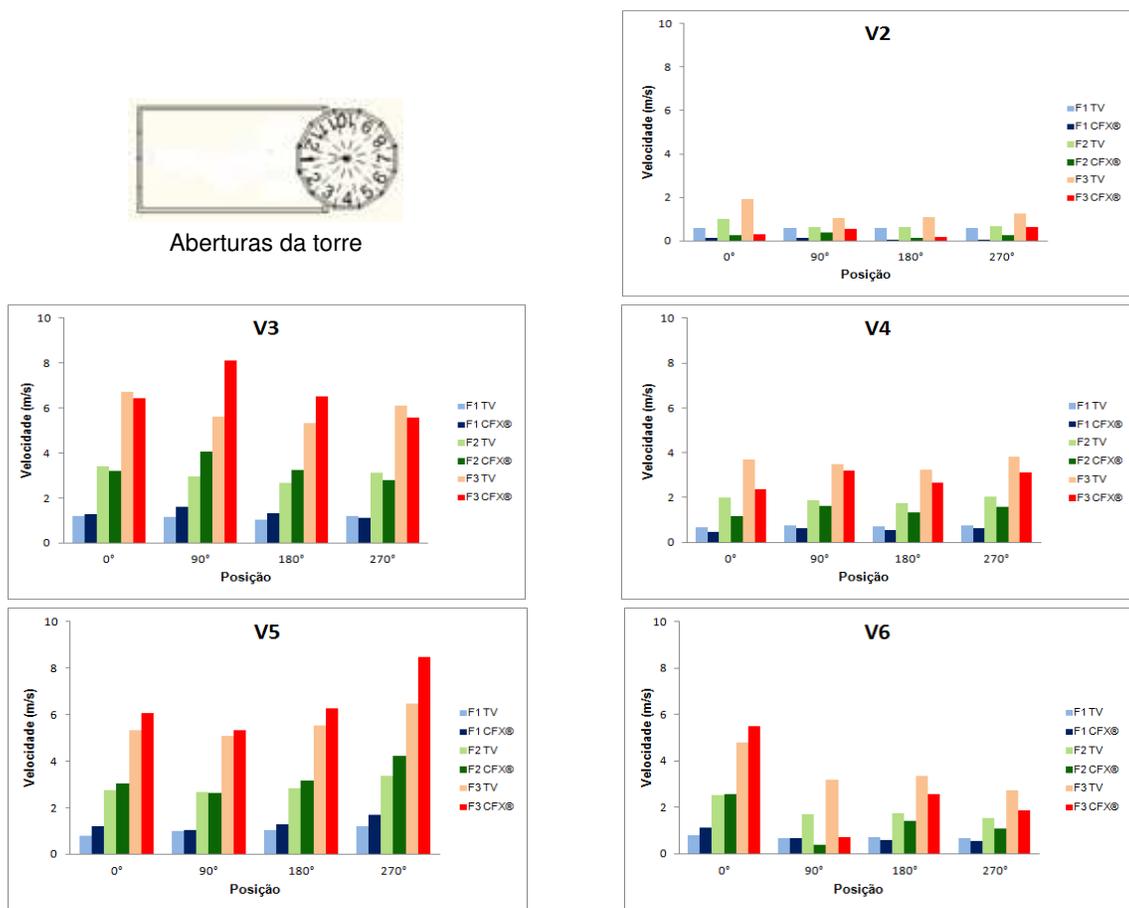
$\Delta V2$: Diferença entre os valores de velocidade do ar no interior da edificação ($V_{2TV} - V_{2CFX}^{\text{®}}$)

$\Delta V3$ a $\Delta V6$: Diferenças entre os valores de velocidade do ar nas aberturas da torre ($V_{TV} - V_{CFX}^{\text{®}}$)

F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.46: Diferenças dos valores de velocidade do ar para a torre octodirecional

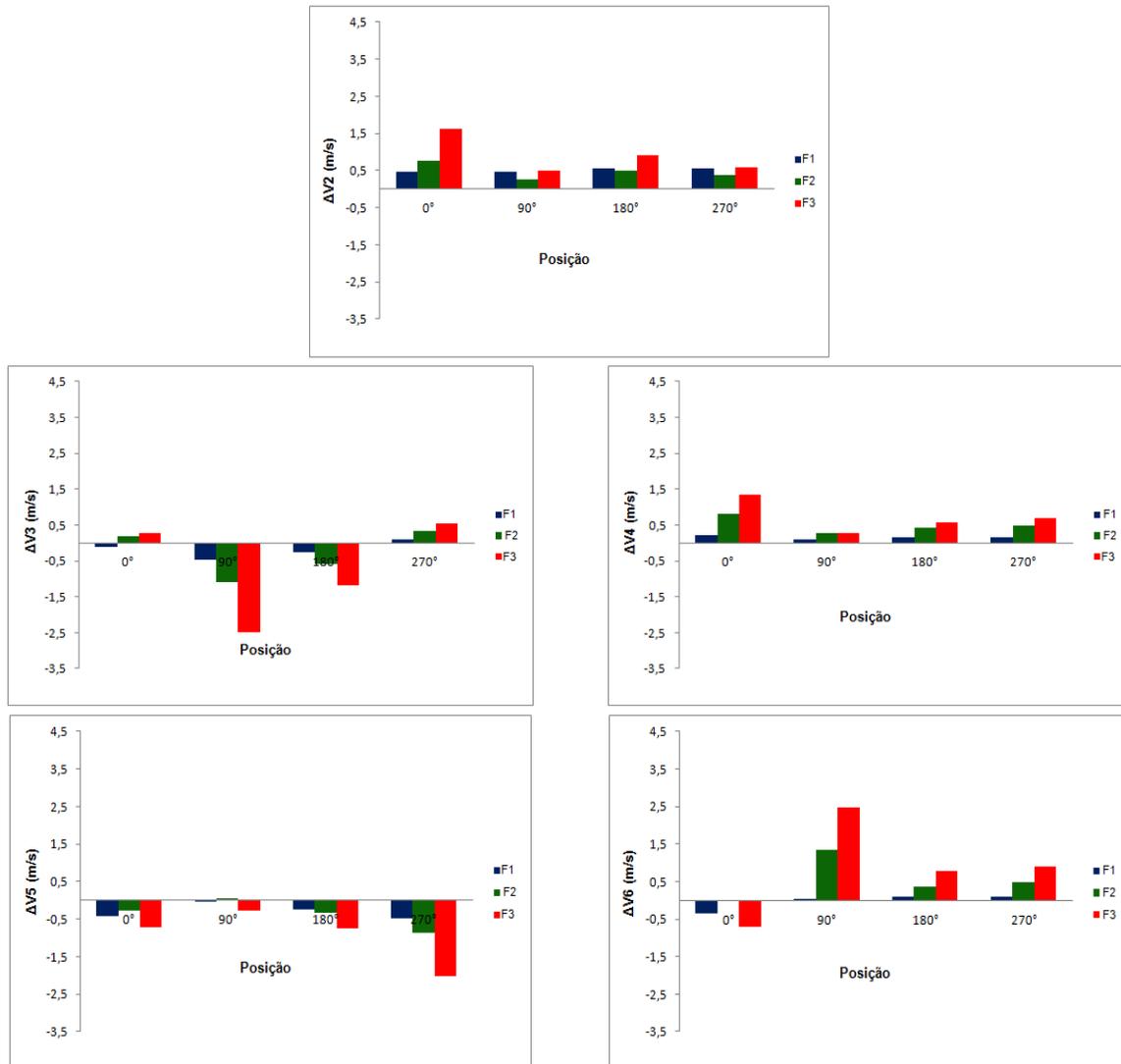
A torre dodecadirecional apresenta os valores da velocidade do ar interno à edificação (V2), registrados nos ensaios do túnel de vento, maiores que os encontrados nas simulações do CFX®, destacando-se a posição de 0°, na qual as diferenças são acentuadas, ao contrário da posição de 90°, onde os valores dos dois métodos são mais próximos. Quanto aos valores da velocidade do ar nas aberturas dessa torre é verificado que tais valores são mais elevados para os dois métodos nas aberturas onde colocaram-se os sensores V3 e V5, assim como na torre octodirecional, e, nas posições de 90° e 180° para V3, e, 0°, 90°, 180° e 270° para V5, os valores simulados são maiores que os ensaiados, mas nas posições de 90°, 180° e 270° para F1 ($V_{f1}=2\text{m/s}$) de V6 os valores dos dois métodos são muito próximos (figura 4.47).



V2: Velocidade do ar no interior da edificação / V3 a V6: Velocidades do ar nas aberturas da torre
F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm
F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.47: Comparação dos valores de velocidade do ar para a torre dodecadirecional
209

As diferenças entre os dois métodos na determinação da velocidade do ar da torre dodecadirecional não apresentam grandes valores, destacando-se F1 e F2 na posição de 90° para $\Delta V5$, F2 em 0° e F1 em 90° para $\Delta V6$, cujos valores são quase nulos, aproximando-se os dois métodos, ao contrário de F3 para 90° em $\Delta V3$ e $\Delta V6$ e 270° em $\Delta V5$, aonde as diferenças chegam a 2,5m/s (figura 4.48).



$\Delta V2$: Diferença entre os valores de velocidade do ar no interior da edificação ($V_{2TV} - V_{2CFX}^{\text{®}}$)

$\Delta V3$ a $\Delta V6$: Diferenças entre os valores de velocidade do ar nas aberturas da torre ($V_{TV} - V_{CFX}^{\text{®}}$)

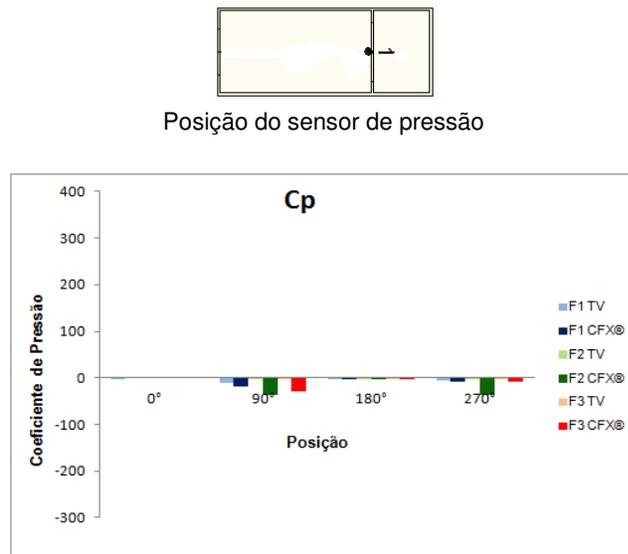
F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.48: Diferenças dos valores de velocidade do ar para a torre dodecadirecional

b) Coeficiente de Pressão

Nas figuras 4.49 a 4.56 representam-se a comparação e as diferenças entre os valores de coeficiente de pressão resultantes dos ensaios no túnel de vento e das simulações no software CFX[®].

Na torre unidirecional percebe-se que os valores do coeficiente de pressão (C_p) obtidos nos ensaios do túnel de vento são menores que os das simulações no software CFX[®], pois todos os seus valores estão próximos de 0, fato provocado pela presença de valores de C_p muito altos em relação aos demais, como pode ser observado nas posições de 90° e 270° para as três frequências consideradas, e, como consequência disso, nas posições de 0° e 180° esses valores tendem a 0 (figura 4.49).



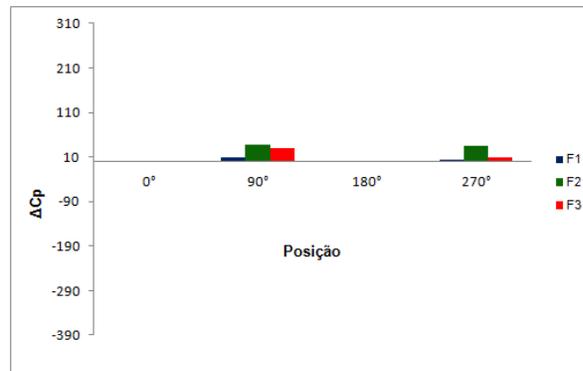
C_p : Coeficiente de pressão na abertura

F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm

F1 CFX[®], F2 CFX[®], F3 CFX[®]: Velocidades simuladas no software CFX[®] correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.49: Comparação dos valores de coeficiente de pressão para a torre unidirecional

Quanto às diferenças dos valores do coeficiente de pressão na torre unidirecional nota-se que as diferenças são mais visíveis em F2 ($V_{f2}=5\text{m/s}$) nas posições de 90° e 270° , e em F3 ($V_{f3}=10\text{m/s}$) na posição de 90° , ao contrário das posições de 0° e 180° cujas diferenças aproximam-se de 0 (figura 4.50).

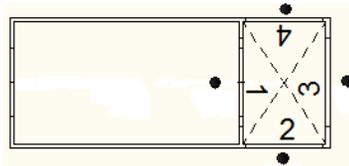


ΔC_p : Diferença entre os valores de coeficiente de pressão na abertura da torre ($\Delta C_{p_{TV}} - \Delta C_{p_{CFX}}^{\text{®}}$)
 F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

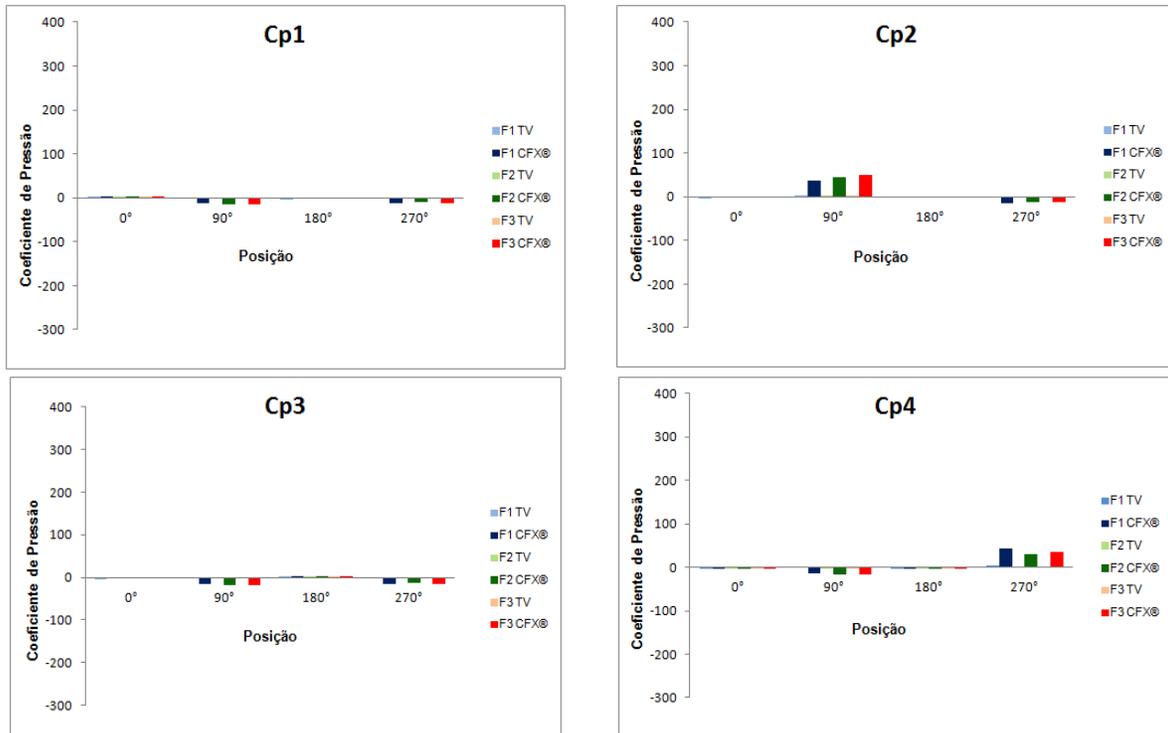
Figura 4.50: Diferenças dos valores de coeficiente de pressão para a torre unidirecional

Para os quatro valores de coeficiente de pressão (C_p) comparados na torre tetradirecional ocorre o mesmo que na torre unidirecional, os C_p s determinados nas simulações são maiores que nos ensaios, e, nas posições de 0° e 180° apresentam-se quase nulos, devido aos C_p s simulados nas posições de 90° e 270° apresentarem valores muito altos (figura 4.51).

Na torre tetradirecional percebe-se que não há grandes diferenças entre os valores de C_p obtidos nos dois métodos, mas nas posições de 90° para ΔC_{p2} e 270° para ΔC_{p4} , as diferenças são mais acentuadas nas três frequências, pelo fato dos C_p s simulados apresentarem altos valores (figura 4.52).



Posições dos sensores de pressão

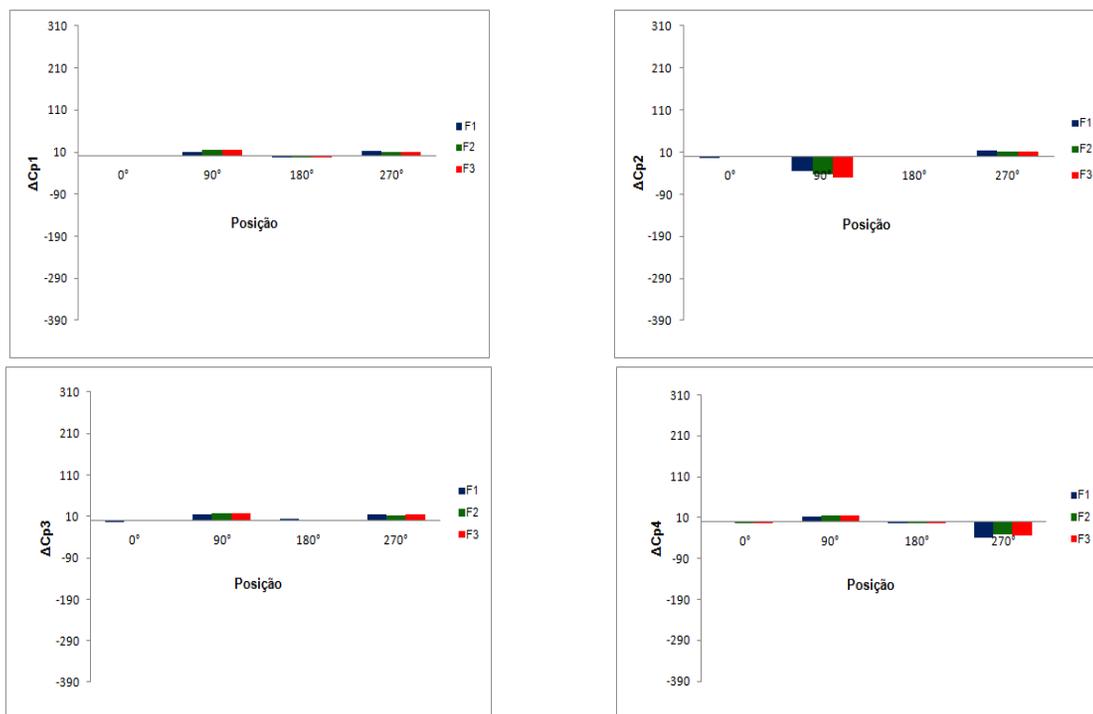


Cp1 a Cp4: Coeficientes de pressão nas aberturas

F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm

F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.51: Comparação dos valores de coeficiente de pressão para a torre tetradirecional

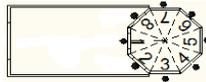


ΔC_{p1} a ΔC_{p4} : Diferenças entre os valores de coeficiente de pressão nas aberturas da torre ($\Delta C_{pTV} - \Delta C_{pCFX}^{\text{®}}$)
 F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

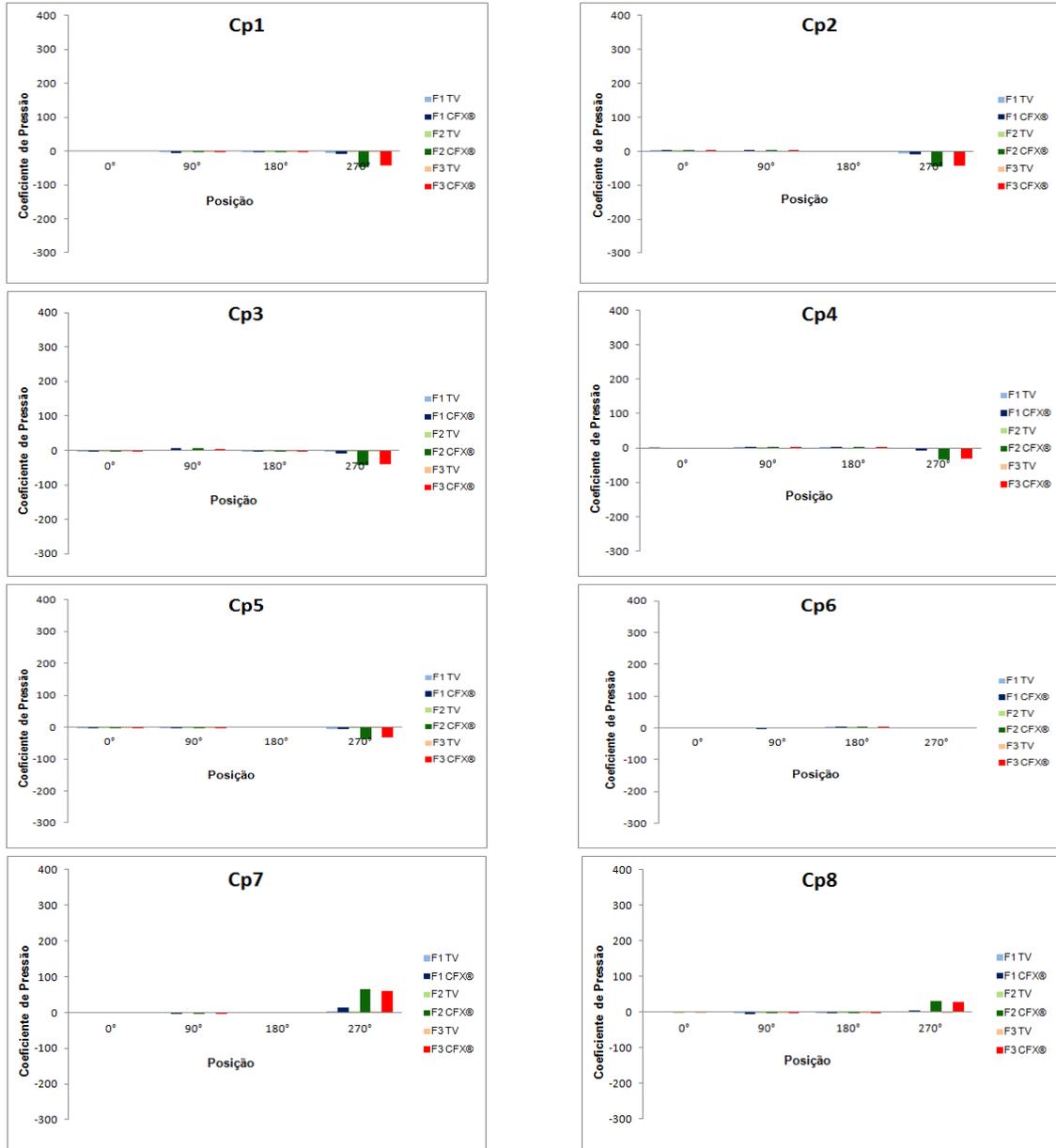
Figura 4.52: Diferenças dos valores de coeficiente de pressão para a torre tetradirecional

A torre octodirecional apresenta valores de coeficiente de pressão (C_p) próximos de 0 para ambos os métodos, como pode ser observado nas posições de 0° , 90° e 180° em todas as frequências e F1 na posição de 270° , excluindo-se o C_p na abertura 6 (C_{p6}), na qual os valores de C_p para as quatro posições quase se anulam. Nas demais aberturas, os valores de C_p simulados são maiores para as frequências F2 e F3 (figura 4.53).

Os valores das diferenças entre os C_p s ensaiados e os simulados na torre octodirecional estão próximos de 0 para as posições de 0° , 90° e 180° nas três frequências consideradas e F1 para 270° . Para as frequências F2 e F3 na posição de 270° , exceto em ΔC_{p6} , as diferenças são maiores, pelo fato dos C_p s simulados apresentarem altos valores (figura 4.54).



Posições dos sensores de pressão

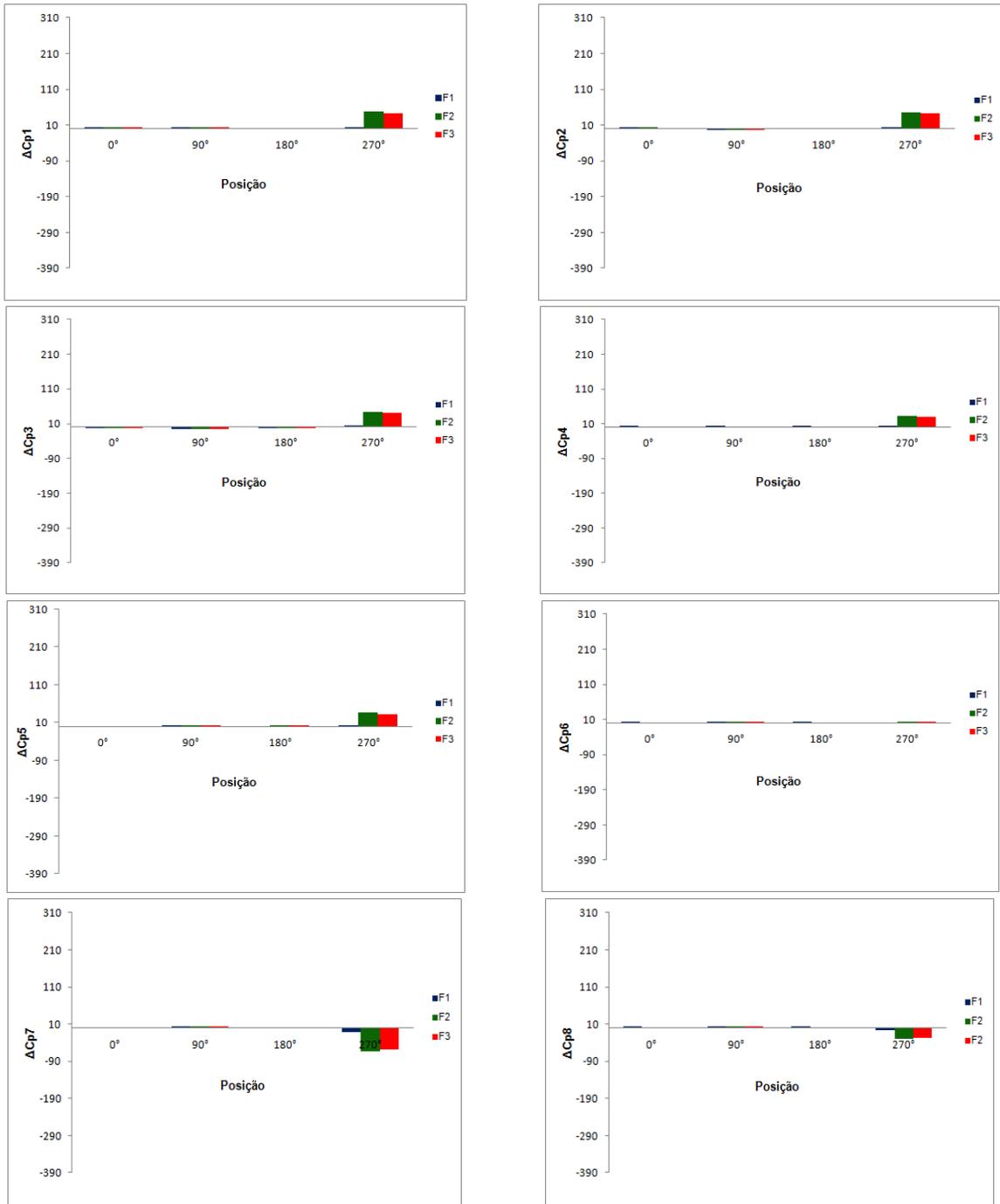


Cp1 a Cp8: Coeficientes de pressão nas aberturas

F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm

F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

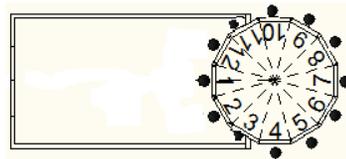
Figura 4.53: Comparação dos valores de coeficiente de pressão para a torre octodirecional



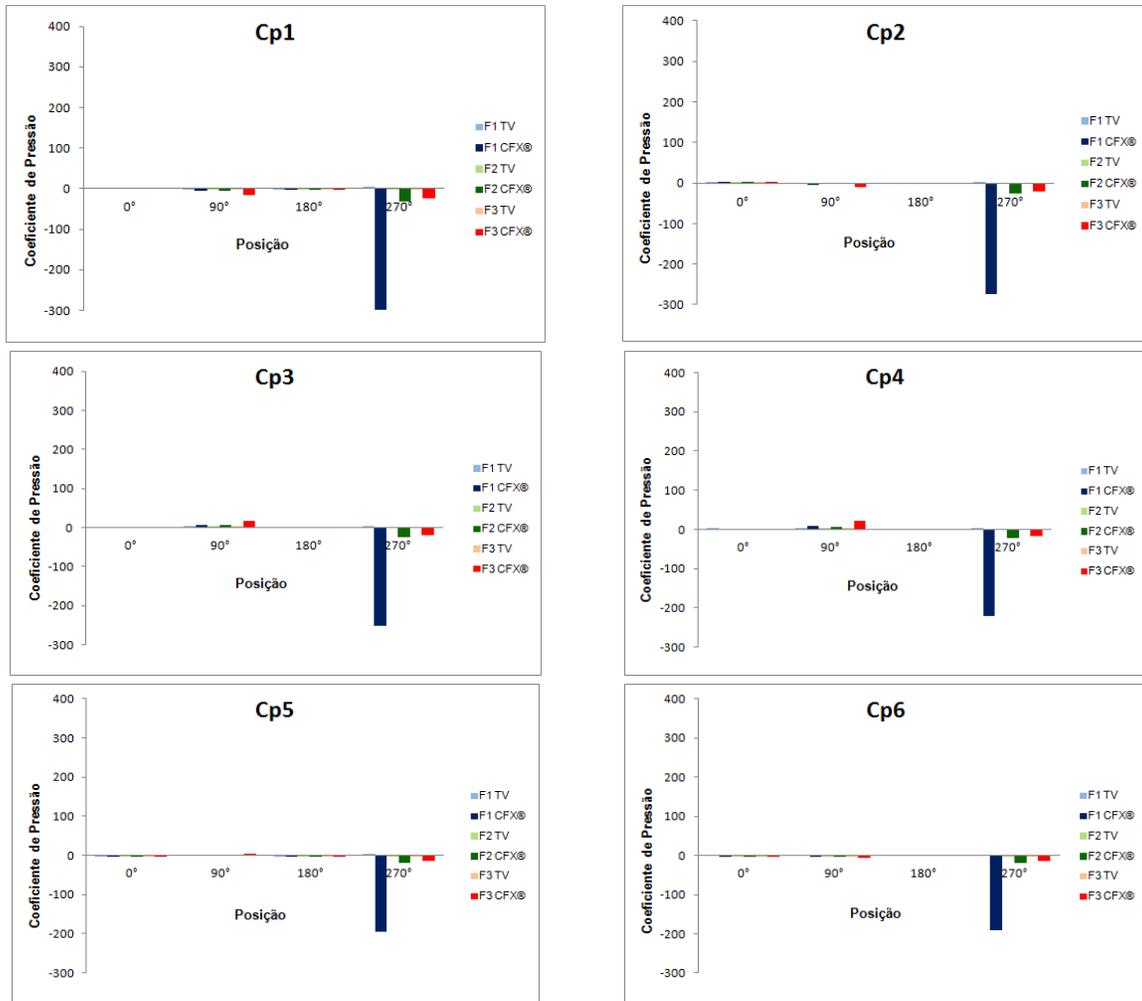
ΔC_{p1} a ΔC_{p8} : Diferenças entre os valores de coeficiente de pressão nas aberturas da torre ($\Delta C_{pTV} - \Delta C_{pCFX}^{\text{®}}$)
 F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

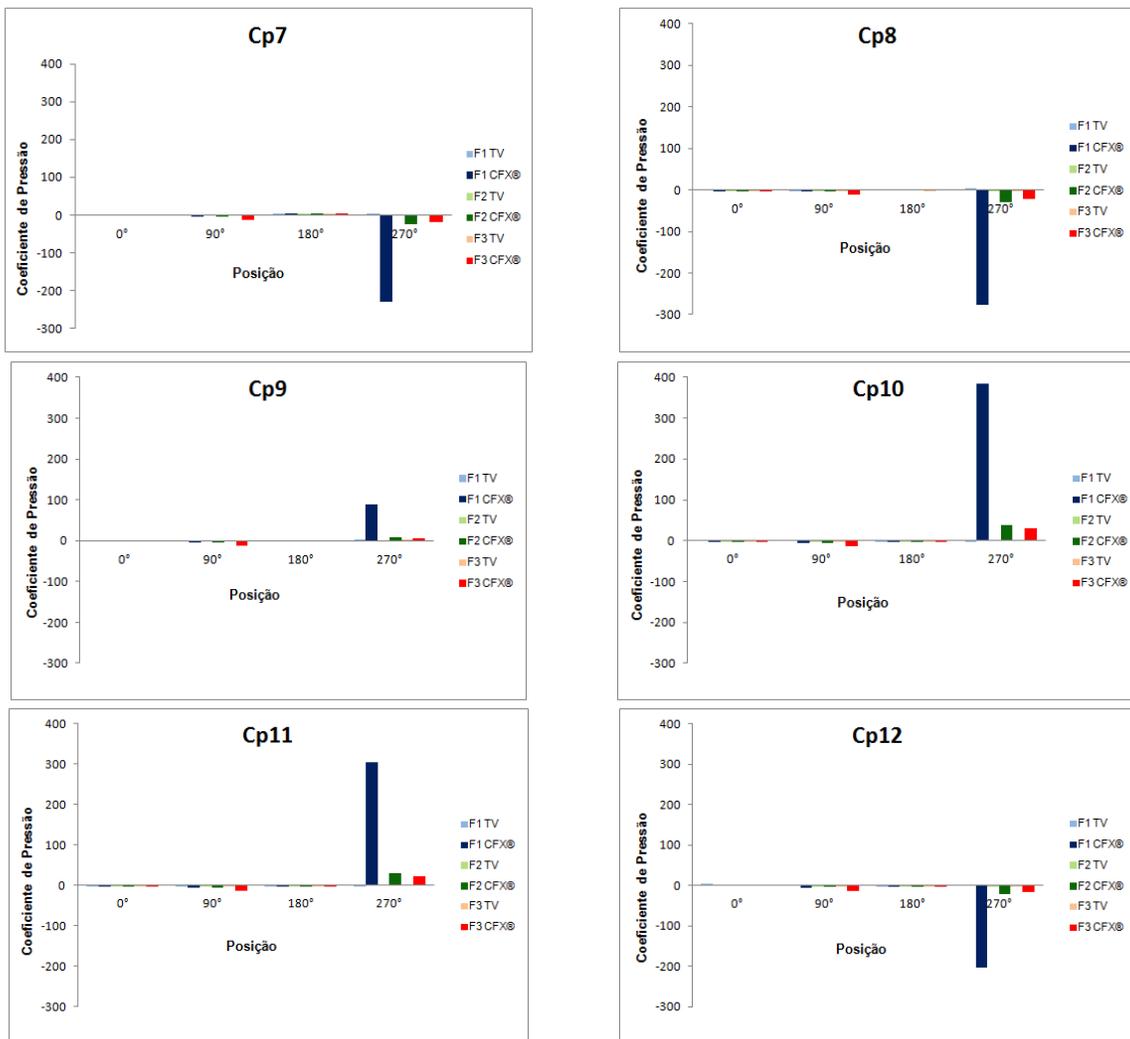
Figura 4.54: Diferenças dos valores de coeficiente de pressão para a torre octodirecional

Considerando os valores de coeficiente de pressão (C_p) da torre dodecadirecional observa-se que nas posições de 0° , 90° e 180° não há grandes diferenças entre os valores de C_p registrados nos ensaios e simulações para as três frequências consideradas nos dois métodos, pois nessas posições os valores estão em torno de 0. Isso ocorre porque na posição de 270° para F1, os valores de C_p em todas as aberturas são muito altos, chegando a ultrapassar o valor de 200 (figura 4.55).



Posições dos sensores de pressão





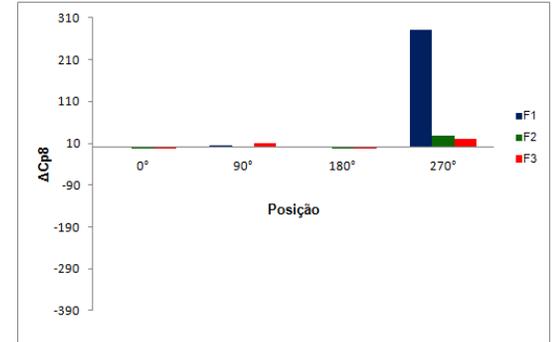
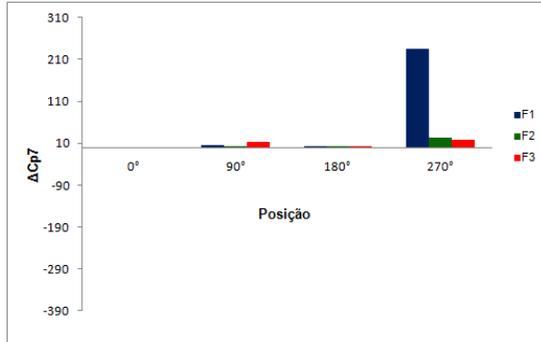
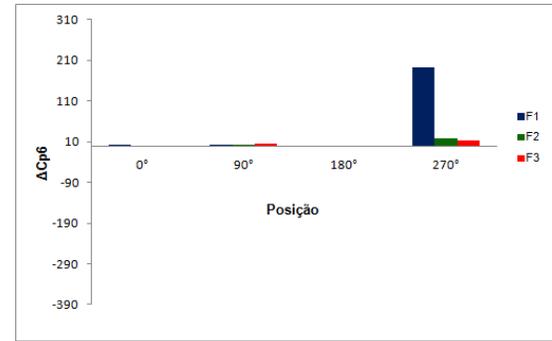
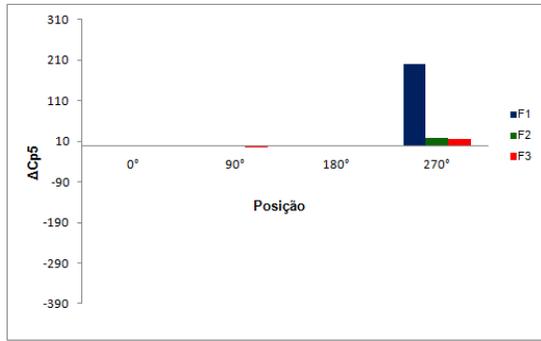
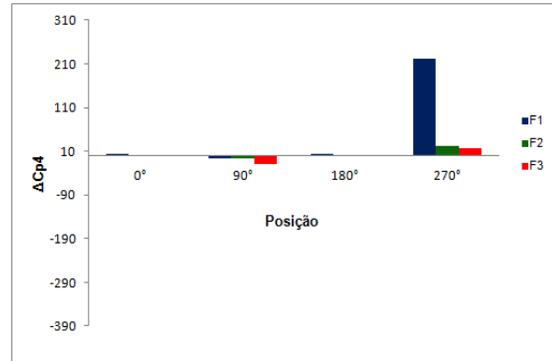
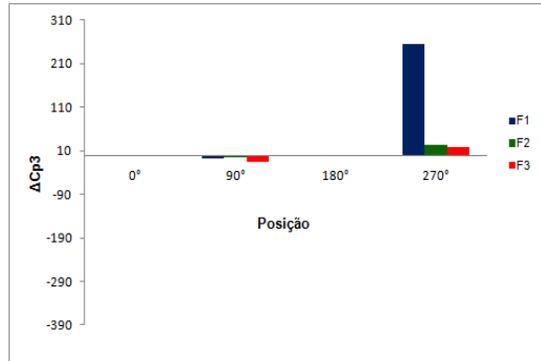
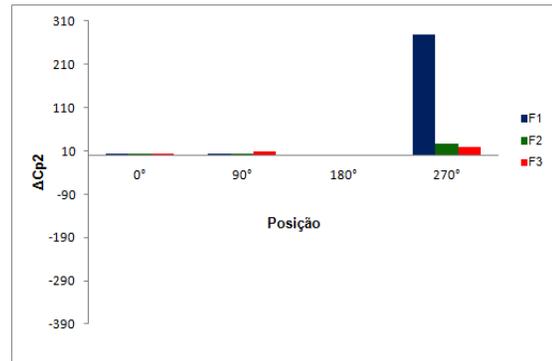
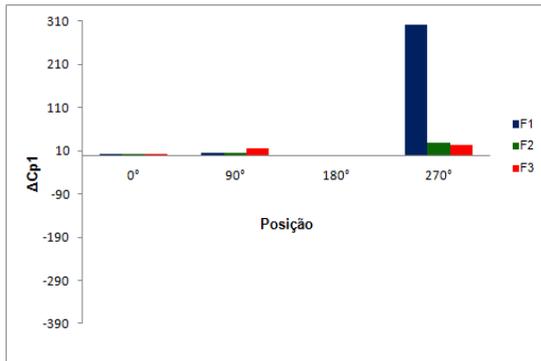
Cp1 a Cp12: Coeficientes de pressão nas aberturas

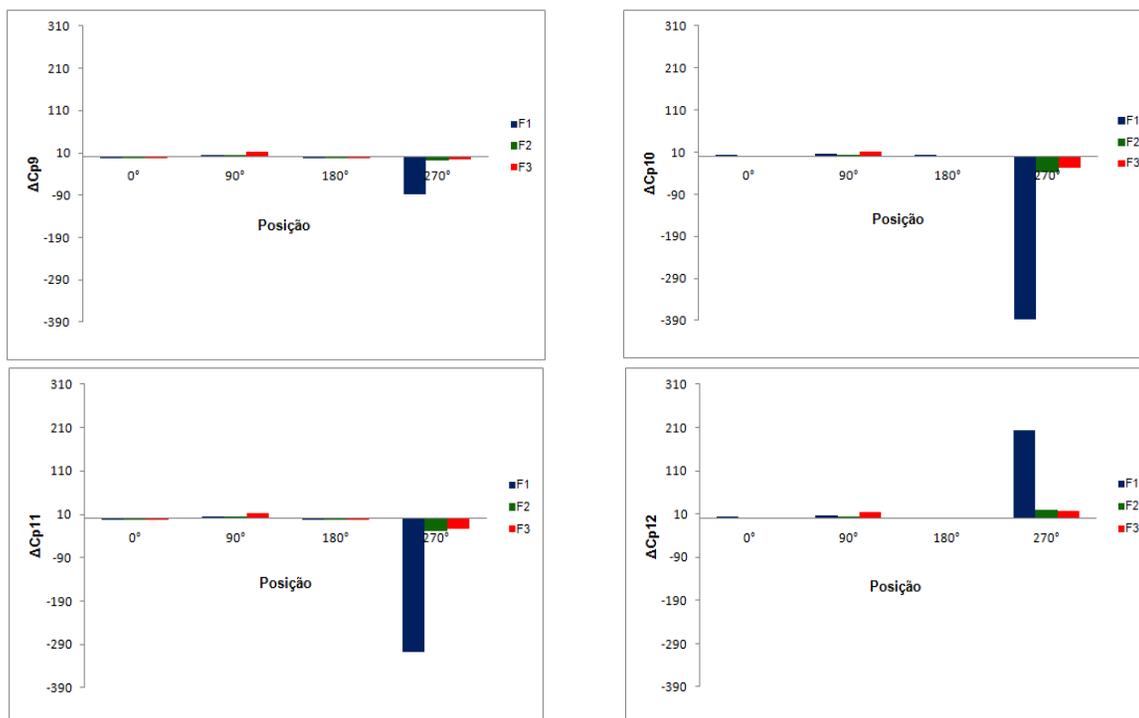
F1 TV, F2 TV, F3 TV: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm e 830rpm

F1 CFX®, F2 CFX®, F3 CFX®: Velocidades simuladas no software CFX® correspondendo respectivamente a: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.55: Comparação dos valores de coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional

Na torre dodecadirecional verifica-se que os valores das diferenças entre os Cps ensaiados e simulados estão em torno de 0 para as posições de 0°, 90° e 180° nas três frequências consideradas, e em 270° nas frequências F2 e F3. Para a frequência F1 na posição de 270° as diferenças são marcantes, devido aos elevados valores de Cp simulados no CFX® (figura 4.56).





ΔC_{p1} a ΔC_{p12} : Diferenças entre os valores de coeficiente de pressão nas aberturas da torre ($\Delta C_{pTV} - \Delta C_{pCFX}^{\text{®}}$)
 F1, F2, F3: Frequências ensaiadas no túnel de vento correspondendo respectivamente a: 145rpm, 410rpm, 830rpm e às velocidades simuladas no software CFX[®]: 2m/s, 5m/s e 10m/s

Figura 4.56: Diferenças dos valores de coeficiente de pressão para a torre dodecadirecional

Embora os softwares CFD apresentem limitações nas simulações, considerou-se como boa a concordância entre os resultados do túnel de vento e das simulações no CFX[®], e, apesar de em alguns pontos os valores absolutos dos dois métodos não serem tão próximos nota-se que ambos seguem o mesmo comportamento para as quatro posições consideradas, constatando-se que o fenômeno em si é compatível.

5. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, conclui-se que a eficiência da ventilação de uma edificação com torre de vento, atuando como captador, não está relacionada apenas ao número de aberturas de entrada do ar da torre (hipótese), mas também às dimensões dessas aberturas, as quais determinam a distância entre as divisórias da torre, facilitando ou dificultando a passagem do ar para o interior da edificação, como será melhor explicado a seguir.

5.1. Ensaio no túnel de vento

A comparação entre as quatro torres de vento, em relação à velocidade do ar interna à edificação (V_2), permite concluir que as torres octodirecional e dodecadirecional são as mais eficientes por possuírem maiores picos de velocidade na maioria das posições consideradas.

Quanto aos valores de C_p observou-se que as aberturas mostraram-se eficientes para a entrada do fluxo de ar, mas considerando as três faixas de velocidade (baixa, média e alta) foram as torres octodirecional e dodecadirecional que apresentaram menor variação, permitindo a passagem do ar em todas as direções.

Na análise de velocidade e coeficientes de pressão positivos, notou-se o destaque da torre tetradirecional atuando como captador comparando-a às outras, embora as torres octodirecional e dodecadirecional desempenhem uma maior troca de ar por possuírem maiores valores de velocidade do ar interno (V_2).

Posteriormente a todas as análises verificou-se que o aumento da velocidade do ar interno (V_2) é consequência do número de aberturas da torre e suas dimensões em determinadas posições.

5.2. Simulações no software CFX®

Comparando os quatro modelos de torres quanto à velocidade do ar interno (V_2) conclui-se que as torres octodirecional e dodecadirecional são mais eficazes no aumento da ventilação interna, por apresentarem os maiores valores, notadamente na posição de 0° para as três frequências consideradas nas simulações.

Na análise de velocidade do ar e coeficientes de pressão positivos foi observado que a torre octodirecional destacou-se como captador em relação às outras, além de permitir uma adequada ventilação interna à edificação, e, assim como nos ensaios do túnel de vento verificou-se que a velocidade do ar interno (V_2) está relacionada com o número e tamanho das aberturas em posições diferenciadas.

O uso de uma ferramenta CFD em simulações, como o software CFX®, oferece grande auxílio no projeto de ventilação, e, os resultados fornecidos comprovam fenômenos conhecidos e esperados, além de identificar pontos de melhoria no projeto. Embora essas simulações sejam complexas e demoradas, seus resultados permitem uma avaliação visual e segura para o desenvolvimento de projetos, desde seus estágios iniciais até a verificação final de desempenho, dependendo dos dados de entrada disponíveis.

5.3. Ensaios no túnel de vento e Simulações no software CFX®

Os valores das diferenças entre os ensaios no túnel de vento e as simulações no CFX® não foram significativas em relação à velocidade do ar interno (ΔV_2), pois na maioria dos casos esses valores estão em torno de 2m/s para as três frequências consideradas, mostrando uma aproximação satisfatória entre os dois métodos.

Entretanto, as diferenças das velocidades do ar nas aberturas apresentam grandes divergências, ocorrendo o mesmo com os coeficientes de pressão, principalmente os valores simulados para a posição de 270° da torre dodecadirecional na frequência F1

($V_{f1}=2\text{m/s}$), fato provocado provavelmente pela entrada de dados inadequados no CFX[®].

Os softwares baseados na dinâmica dos fluidos computacional podem ser uma notável ferramenta para avaliação qualitativa e quantitativa da ventilação natural em edificações, porém em simulações computacionais CFD, a precisão e a confiabilidade dos resultados são muito importantes, uma vez que estes são sensíveis a um extenso número de parâmetros computacionais definidos pelo usuário, mas em casos duvidosos, estudos de verificação e validação dos resultados, utilizando outros métodos, como o túnel de vento, são indispensáveis.

5.4. Sugestões para pesquisas futuras

Diminuir o número de divisórias nas torres octodirecional e dodecadirecional e verificar a influência na ventilação interna da edificação.

Reduzir as espessuras das divisórias das torres e verificar a influência na circulação do ar ao longo das torres e no interior da edificação.

Aumentar o número de aberturas na edificação e verificar a influência em sua ventilação interna.

Refazer os ensaios e as simulações considerando as torres inseridas em meio urbano (edificações ao redor).

Refazer os ensaios e as simulações com outros modelos de turbulência, verificando a sua influência na circulação do ar ao longo das torres e no interior da edificação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, K.; KHARE, M.; CHAUDHRY, K.K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections – a review. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 93, n. 9, p. 697-717, Sep. 2005.

AL-SHAALI, R.S. Maximizing natural ventilation by design in low rise residential buildings using wind catchers in the hot arid climate of UAE. 2002. 171p. Thesis (Master of Building Science), Faculty of the School of Architecture, University of Southern California, Los Angeles, 2002. Disponível em: <http://arch.usc.edu/content/pages/cm/uploadedmedia/maximizing_natural_ventilation_by_design_in_low_rise_residential_buildings_using_wind_catchers1249427057287.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

ANSYS. CFX 12.1 Solver Models. Diddcot Oxfordshire: CFX, 2009.

ARAÚJO, C.V.A.; CUNHA, L.J.B.F. Proposta de método para potencializar o uso da ventilação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2010.

ASFOUR, O.S.; GADI, M.B. Effect of integrating wind catchers with curved roofs on natural ventilation performance in buildings. Architectural Engineering and Design Management. V. 2, n. 4, p. 289-304, Jan. 2006.

ASIMAKOPOULOS, D.N.; ASSIMAKOPOULOS, V.D.; CHRISOMALLIDOU, N.; KLITSIKAS, N.; MANGOLD, D.; MICHEL, P.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A. Energy and climate in the urban built environment. London: James & James, 2001.

ATTIA, S.; HERDE, A. Designing the Malqaf for summer cooling in low-rise housing, an experimental study. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 26., 2009, Quebec. Anais... Londres: AAL, 2009. Disponível em: <<http://www.plea2009.arc.ulaval.ca/Papers/2.STRATEGIES/2.2%20Heating%20and%20Cooling/POSTER/2-2-28-PLEA2009Quebec.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

A'ZAMI, A. Badgir in traditional Iranian architecture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 1., 2005, Santorini. Anais... Atenas: Heliotopos Conferences, 2005. Disponível em:

<http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/palenc/2005/Azami2.pdf>.

Acesso em: 23 mar. 2010.

BADRAN, A.A. Performance of cool towers under various climates in Jordan. Energy and Buildings. V. 35, n. 10, p.1031-1035, Nov. 2003.

BADY, M.; KATO, S.; TAKAHASHI, T.; HUANG, H. An experimental investigation of the wind environment and air quality within a densely populated urban street canyon. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 99, n. 8, p. 857-867, Aug. 2011.

BAHADORI, M.N. Viability of wind towers in achieving summer comfort in the hot arid regions of the Middle East. Renewable Energy. V. 5, n. 5-8, p. 879-892, Aug. 1994.

BAHADORI, M.N.; MAZIDI, M.; DEGHANI, A.R. Experimental investigation of new designs of wind towers. Renewable Energy. V. 33, n. 10, p. 2273-2281, Oct. 2008.

BAHRAMI, S. Energy efficient buildings in a warm climates of the Middle East: experience in Iran and Israel. 2008. 98p. Thesis (Master of Science in Environmental Management and Policy), Lund University, Lund, 2008. Disponível em: <<http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1481091&fileId=1481092>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

BANSAL, N.K.; SODHA, M.S.; SHARMA, A.K.; RAKSHIT, R. A solar passive building for hot arid zones in India. Energy Conversion Management. V. 32, n. 1, p. 1-9, Jan.-Feb. 1991.

BATTLE, G.S.; ZANCHETTA, M.; HEATH, P. Wind towers and wind driven ventilation. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 6., 2000, Brighton. Anais... Brighton: A.A.M. Sayigh, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevierscience.com/wrec/papers>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

BITTENCOURT, L.S.; LOBO, D.G.F. A influência da localização das aberturas na ventilação natural de edificações escolares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 1999.

BITTENCOURT, L.S.; PEIXOTO, L.K.O. O efeito da forma das envazaduras arquitetônicas na ventilação de salas de aula. In: ENCONTRO NACIONAL DE

CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 1999.

BOUCHAHM, Y.; BOURBIA, F.; BELHAMRI, A. Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. Renewable Energy. V. 36, n. 3, p. 898-906, Mar. 2011.

BU, Z.; KATO, S.; TAKAHASHI, T. Wind tunnel experiments on wind-induced natural ventilation rate in residential basements with areaway space. Building and Environment. V. 45, n. 10, p. 2263-2272, Oct. 2010.

BUCCOLIERI, R.; GROMKE, C.; DI SABATINO, S.; RUCK, B. Aerodynamic effects of trees on pollutant concentration in street canyons. Science of the Total Environment. V. 407, n. 19, p. 5247-5256, Sep. 2009.

CAMARGO, R.M.; MATSUMOTO, E.; LABAKI, L.C.; MATOS, J.C.S.F.; LUKIANTCHUKI, M.A.; CARAM, R.M. Realização de testes para a ventilação natural em túnel de vento para analisar a eficiência dos sheds em hospitais da rede Sarah. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2010.

CARVALHO, H.J.M.; CORBELLA, O.D.; SILVA, F.A.G. Influência da direção dos ventos sobre as correlações entre a forma urbana e o clima. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

CERMAK, J.E. Wind tunnel development and trends in applications to civil engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 91, n. 3, p. 355-370, Feb. 2003.

CHENG, C.K.C.; LAM, K.M.; LEUNG, Y.T.A.; YANG, K.; LI-DANNY, H.W.; CHEUNG-SHERMAN, C.P. Wind-induced natural ventilation of re-entrant bays in a high-rise building. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 99, n. 2-3, p. 79-90, Feb.-Mar. 2011.

CHIARELLO, J.A. Ventilação natural por efeito chaminé – estudo em modelo reduzido de pavilhões industriais. 2006. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CHIU, Y.H.; ETHERIDGE, D.W. Experimental technique to determine unsteady flow in natural ventilation stacks at model scale. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 92, n. 3-4, p. 291-313, Mar. 2004.

CHU, C.R.; CHIU, Y.H.; CHEN, Y.J.; WANG, Y.W.; CHOU, C.P. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation. Building and Environment. V. 44, n. 10, p. 2064-2072, Oct. 2009.

CHU, C.R.; CHIU, Y.H.; WANG, Y.W. An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings. Energy and Buildings. V. 42, n. 5, p.667-673, May. 2010.

CHU, C.R.; CHEN, R.H.; CHEN, J.W. A laboratory experiment of shear-induced natural ventilation. Energy and Buildings. V. 43, n. 10, p.2631-2637, Oct. 2011.

CÓDIGO SANITÁRIO. DECRETO No. 12343. Regulamento da promoção, preservação e recuperação da saúde no campo de competência da Secretaria de Estado da Saúde. São Paulo, 1978.

COELHO, A.L.F.; TIBIRIÇÁ, A.M.B.; TIBIRIÇÁ, A.C.G.; CAMPOS, J.C.C. Simulação CFD em regime transiente de um auditório para o levantamento da distribuição de temperaturas durante os períodos de refrigeração de condicionador de ar tipo split. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2011, Búzios. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2011.

CORBELLA, O.D.; LOREDO-SOUZA, A.M.; PALUCH, M.J. Apresentação do túnel de vento da FAU/UFRJ. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

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

CÓSTOLA, D. Ventilação por ação do vento no edifício: procedimento para quantificação. 2006. 215p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M.P. Utilização de CFD para definição de coeficientes de pressão externos de um edifício. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M.P.; ETHERIDGE, D.W. Similaridade e escala em ensaios de ventilação em túnel de vento. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M.P.; ETHERIDGE, D.W. Caracterização de janelas no cálculo de vazão por meio do coeficiente de descarga. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.

CÓSTOLA, D.; ETHERIDGE, D.W. Unsteady natural ventilation at model scale-flow reversal and discharge coefficients of a short stack and an orifice. Building and Environment. V. 43, n. 9, p. 1491-1506, Sep. 2008.

CUNHA, L.J.B.F. Proposição de um método de estimativa do coeficiente de pressão em aberturas de edificações naturalmente ventiladas com o uso do CFD. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2010.

DAVIDSON, M.J.; SNYDER, W.H.; LAWSON JR, R.E.; HUNT, J.C.R. Wind tunnel simulations of plume dispersion through groups of obstacles. Atmospheric Environment. V. 30, n. 22, p. 3715-3731, Nov. 1996.

DIMITROVA, R.; SINI, J.F.; RICHARDS, K.; SCHATZMANN, M.; WEEKS, M.; GARCIA, P.E.; BORREGO, C. Influence of thermal effects on the wind field within the urban environment. Boundary Layer Meteorology. V. 131, n. 2, p. 223-243, May. 2009.

DRACH, P.R.C.; VASCONCELLOS, V.M.N.; CORBELLA, O.D. Desenvolvimento de experimentos didáticos para visualização de vento: simulação experimental em túnel de vento e simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 13., 2010, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2010.

EDWARDS, B. O guia básico para a sustentabilidade. Tradução de Cláudia Ardións Espasandin. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

ELMUALIM, A.A. Modelling of a windcatcher for natural ventilation. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 8., 2004, Denver. Anais... Brighton: A.A.M. Sayigh, 2004. Disponível em:<<http://www.aseanenergy.info/Abstract/32010181.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

EL-SHORBAGY, A.M. Design with nature: windcatcher as a paradigm of natural ventilation device in buildings. International Journal of Civil & Environmental Engineering. V. 10, n. 3, p. 26-31, Jun. 2010.

FORTUNA, A. R. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações. São Paulo: EdUSP, 2000.

FOUDAZI, F.; M'RITHAA, M. Sustainable solutions for cooling systems in residential buildings: case study in the Western Cape Province, South Africa. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABILITY ENGINEERING AND SCIENCE, 4., 2010, Auckland. Anais... Auckland: Sustainability Society, 2010. Disponível em: <<http://www.thesustainabilitysociety.org.nz/conference/2010/papers/Foudazi-M'Rithaa.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2011.

GHAEMMAGHAMI, P.S.; MAHMOUDI, M. Wind tower a natural cooling system in Iranian traditional architecture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 1., 2005, Santorini. Anais... Atenas: Heliotopos Conferences, 2005. Disponível em:<http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/inive/palenc/2005/ghaemmaghami.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

GIVONI, B. Climate considerations in building and urban design. New York: J. Wiley, 1998.

_____. Man, climate and architecture. 2. ed. London: Applied science publishers, 1976.

_____. Passive and low energy cooling of buildings. New York: J. Wiley, 1994.

GROMKE, C.; BUCCOLIERI, R.; DI SABATINO, S.; RUCK, B. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data. Atmospheric Environment. V. 42, n. 37, p. 8640-8650, Dec. 2008.

HAWKER, R.W. Reflections on the wind tower house: architectural style and historical context on the tracial coast. Tribulus. V. 11, n. 2, p. 18-22, Aut./Win. 2001. Disponível em: <<http://www.enhg.org/trib/V11N2/TribulusV11N2Searchable.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

HERNANDES, T.; DUARTE, D.; GONÇALVES, J. Projeto de edifício alto para a cidade de São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2003.

JAFARIAN, S.M.; JAAFARIAN, S.M.; HASELI, P.; TAHERI, M. Performance analysis of a passive cooling system using underground channel (Naghb). Energy and Buildings. V. 42, n. 5, p. 559-562, May. 2010.

JI, L.; TAN, H.; KATO, S.; BU, Z.; TAKAHASHI, T. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation. Building and Environment. V. 46, n. 12, p. 2490-2499, Dec. 2011.

JIANG, Y.; ALEXANDER, D.; JENKINS, H.; 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. V. 91, n. 3, p. 331-353, Feb. 2003.

KALANTAR, V. Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region. Renewable Energy. V. 34, n. 1, p. 246-254, Jan. 2009.

KANG, D.; STRAND, R.K. Simulation of passive down-draught evaporative cooling (PDEC) systems in Energyplus[®]. In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION CONFERENCE, 11., 2009, Glasgow. Anais... Glasgow: IBPSA, 2009. Disponível em: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0369_376.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

KANG, J.H.; LEE, S.J. Improvement of natural ventilation in a large factory building using a louver ventilator. Building and Environment. V. 43, n. 12, p. 2132-2141, Dec. 2008.

KARAKATSANIS, C.; BAHADORI, M.N.; VICKERY, B.J. Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers. Solar Energy. V. 37, n. 5, p. 363-374, Sep.-Oct. 1986.

KATO, S.; MURAKAMI, S.; TAKAHASHI, T.; GYOBU, T. Chained analysis of wind tunnel test and CFD on cross ventilation of large-scale market building. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 67-68, p. 573-587, Apr.-Jun. 1997.

KIM, T.; KIM, K.; KIM, B.S.A. Wind tunnel experiment and CFD analysis on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea. Building and Environment. V. 45, n. 5, p. 1329-1338, May. 2010.

KOCH-NIELSEN, H. Stay cool: a design guide for the built environment in hot climates. London: James & James, 2002.

KOSMAR, H. Characteristics of natural wind simulations in the TUM boundary layer wind tunnel. Theoretical and Applied Climatology. V. 106, n. 1-2, p. 95-104, Nov. 2011.

KUBOTA, T.; MIURA, M.; TOMINAGA, Y.; MOCHIDA, A. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. Building and Environment. V. 43, n. 10, p. 1699-1708, Oct. 2008.

KULTERMANN, U. Contemporary architecture in the Arab States. New York: McGraw-Hill, 1999.

LABAKI, L.C.; MATSUMOTO, E.; MORAIS, J.M.S.C.; MEDINILHA, T.A.; OLIVEIRA, M.C.A. Ventilation in self-built houses - A study through wind tunnel measurements in Campinas, Brazil. International Journal of Ventilation. V. 10, n. 2, p. 115-124, Sep. 2011.

LARSEN, T.S.; HEISELBERG, P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. Energy and Buildings. V. 40, n. 6, p. 1031-1040, Jun. 2008.

LIDDAMENT, M. W. Air Infiltration Calculation Techniques: an applications guide. Bracknell: AIVC, 1986.

LIU, X.P.; NIU, J.L.; KWOK, K.C.S.; WANG, J.H.; LI, B.Z. Investigation of indoor air pollutant dispersion and cross-contamination around a typical high-rise residential building: wind tunnel tests. Building and Environment. V. 45, n. 8, p. 1769-1778, Aug. 2010.

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

LU, W.; HOWARTH, A.T.; JEARY, A.P. Prediction of airflow and temperature field in a room with convective heat source. Building and Environment. V. 32, n. 6, p. 541-550, Nov. 1997.

LUO, Z.; LI, Y. Passive urban ventilation by combined buoyancy-driven slope flow and wall flow: parametric CFD studies on idealized city models. Atmospheric Environment. V. 45, n. 32, p. 5946-5956, Oct. 2011.

MACHADO, R.C.; TIBIRIÇÁ, A.C.G.; JENTZSCH, R. Projeto de túnel de vento a baixas velocidades para estudos de arquitetura e engenharia. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2008, Fortaleza. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2008.

MAK, C.M. Application of computational fluid dynamics to the study of designed green features for sustainable buildings. In: OH, H.W. Computational Fluid Dynamics. Croácia: InTech, 2010, p. 173-198. Disponível em: <http://www.intechopen.com/source/pdfs/6735/InTech-Application_of_computational_fluid_dynamics_to_the_study_of_designed_green_features_for_sustainable_buildings.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2011.

MALEKI, B.A.; SHABESTARI, A.F. Optimization of Badgir (wind tower) in Iranian hot-arid region architecture. In: CONFERENCE ON TECHNOLOGY & SUSTAINABILITY IN THE BUILT ENVIRONMENT, 1, 2010, Riad. Anais... Riad: CAP/KSU, 2010. Disponível em: <http://ipac.kacst.edu.sa/eDoc/2010/183460_1.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2011.

MARTINS, T.A.L.; BASTOS, L.E.G.; BARROSO-KRAUSE, C.; BITTENCOURT, L.S.; PASSOS, I. O uso de torres de vento em edificações residenciais geminadas de meia morada. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.

MATSUMOTO, E.; CARAM, R.M. Coletor inercial para ventilação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

MATSUMOTO, E.; LABAKI, L.C. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento utilizando tubos e conexões de PVC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2012.

MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F.A.; NEFUSSI, N. Engenharia de ventilação industrial. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1988.

MOHAMMADZADEH, N.; HAGHPARAST, F. A modern use of cooling systems being used in Iranian traditional wind catcher (Badgir). In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 25., 2008, Dublin. Anais... Londres: AAL, 2008. Disponível em: <http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/poster/PLEA_FinalPaper_ref_680.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

MONTAZERI, H. Experimental and numerical study on natural ventilation performance of various multi-opening wind catchers. Building and Environment. V. 46, n. 2, p. 370-378, Feb. 2011.

MONTAZERI, H.; AZIZIAN, R. Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher. Building and Environment. V. 43, n. 12, p. 2193-2202, Dec. 2008.

MOTEZUKI, F. K.; CHENG, L.Y. Estudo da ventilação em ambientes de habitações utilizando índices de ventilação e lógica nebulosa. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009a.

MOTEZUKI, F. K.; CHENG, L.Y. Uma ferramenta baseada em CFD para simulação e análise da ventilação natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009b.

NASRI, M.; HEKMATPANAHA, R. Productivity and energy management in desert urban. Special Journal of the World Academy of Science, Engineering and Technology. V. 69, p. 379-382, 2010. Disponível em: <<http://www.waset.org/journals/waset/v69/v69-68.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2011.

NUNES, D.A. Estudo da ventilação natural por efeito do vento em pavilhões industriais utilizando modelos reduzidos. 2006. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia),

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

OLIVEIRA, B.Y.; MARIANO, G.C.; QUADRI, M.B. Um estudo CFD de vazamento de óleo a partir de dutos submersos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2009, Uberlândia. Anais... São Paulo: ABEQ, 2009. Disponível em: <www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/99517091.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

OLIVEIRA, M.C.A.; LABAKI, L.C.; VATAVUK, P. Proposta de metodologia para estudo de ventilação ao redor de construções, através do uso de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2011, Búzios. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2011.

PEREGRINO, P.S.A.; SILVA, F.A.G. Escoamentos de ventos e padrões de ocupação do solo em João Pessoa/PB. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

PERÉN, J.I.; GRECO, P.; CARAM, R.M. Análise computacional dos sheds da rede de hospitais Sarah Kubitschek utilizando o software Analisys CFX. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

POSHTIBAN, M.; KHOSROUSHAHI, R.B.; POSHTIBAN, S. Intelligent wind catcher – a combination of modern and traditional technology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION & ROBOTICS IN CONSTRUCTION, 24., 2007, Kochi. Anais... Eindhoven: IAARC, 2007. Disponível em: <<http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB11106.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

PRATA, A.R.; FROTA, A.B. Caracterização climática – estudo de caso na cidade de Santos, São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

PRATA, A.R.; CELANI, G.; FROTA, A.B. Construção de modelos físicos para análise da ventilação natural em túnel de vento. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2011, Búzios. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2011.

PRAVIA, Z.M.C.; CORONETTI, L. Um protótipo de um mini túnel de vento (MTV) para ensino de graduação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM

ENGENHARIA, 26., 2003, Rio de Janeiro. Anais... Brasília: ABENGE, 2003. Disponível em:

<http://www.iese.upf.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=2&Itemid=19>. Acesso em: 23 mar. 2010.

QUEIROGA, S.C.C.; SILVA, F.A.G. Dimensionamento de aberturas considerando a ventilação natural em edifício residencial multifamiliar na cidade de João Pessoa/PB. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2007.

QUEIROZ, N.; OLIVEIRA, R.; FERREIRA, A.L.; PEDRINI, A. Análise do comportamento da ventilação nos conjuntos habitacionais unifamiliares por meio de simulação computacional de fluídos (CFD), na cidade de Natal/RN. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2009, Natal. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2009.

RIVERO, R. Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural. Tradução de José Miguel Aroztegui. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1985.

RIZK, A.A.W.A.; ELGHAFAR, M.A.E.A. The effect of wind catchers El-Malaqaf – on the internal natural ventilation in hot climates with special reference to Egypt: a study on small physical models. Assiut University Bulletin for Environmental Researches. V. 10, n. 1, p. 1-11, 2007. Disponível em: <http://www.aun.edu.eg/env_enc/march_2007>. Acesso em: 23 mar. 2010.

ROAF, S. Air-conditioning avoidance: lessons from the wind catchers of Iran. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 1., 2005, Santorini. Anais... Atenas: Heliotopos Conferences, 2005. Disponível em: <http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5Cpalenc%5C2005%5CRoaf.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2010.

ROSHAN, M. New method in modern architecture by employing natural element with helping technology. In: THE PROCEEDING OF THE FIRST IRANIAN STUDENTS SCIENTIFIC CONFERENCE IN MALAYSIA, 1., 2011, Kuala Lumpur. Anais... Serdang: UPM, 2011. Disponível em: <<http://www.fileden.com/files/2011/2/28/3088881//CIV-36.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

SAFFARI, H.; HOSSEINNIA, S.M. Two-phase Euler-Lagrange CFD simulation of evaporative cooling in a wind tower. Energy and Buildings. V. 41, n. 9, p. 991-1000, Sep. 2009.

SALMON, C. Architectural design for tropical regions. New York: John Wiley & Sons, 1999.

SAMI, V. Applying computational fluid dynamics to analyse natural ventilation and human comfort in buildings. Society of Building Science Educators. Awards, 2003. Disponível em: <<http://www.sbse.org/awards/docs/2003/Sami1.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

SANTAMOURIS, M. Natural ventilation in buildings: a design handbook. London: James & James, 1998.

STAVRAKAKIS, G.M.; ZERVAS, P.L.; SARIMVEIS, H.; MARKATOS, N.C. Development of a computational tool to quantify architectural- design effects on thermal comfort in naturally ventilated rural houses. Building and Environment. V. 45, n. 1, p. 65-80, Jan. 2010.

SZUCS, A.; MOREAU, S.; ALLARD, F. Aspects of stadium design for warm climates. Building and Environment. V. 44, n. 6, p. 1206-1214, Jun. 2009.

VAN LENGEN, J. Manual do arquiteto descalço. Tradução de Valdo de Freitas Felinto. Porto Alegre: Livraria do Arquiteto, 2004.

WANG, B.; ETHERIDGE, D.W.; OHBA, M. Wind tunnel investigation of natural ventilation through multiple stacks. Part 1: Mean values. Building and Environment. V. 46, n. 7, p. 1380-1392, Jul. 2011a.

WANG, B.; ETHERIDGE, D.W.; OHBA, M. Wind tunnel investigation of natural ventilation through multiple stacks. Part 2: Instantaneous values. Building and Environment. V. 46, n. 7, p. 1393-1402, Jul. 2011b.

WU, Y.C.; YANG, A.S.; TSENG, L.Y.; LIU, C.L. Myth of ecological architecture designs: comparison between design concept and computational analysis results of natural ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia. Energy and Buildings. V. 43, n. 10, p. 2788-2797, Oct. 2011.

ZARANDI, M.M. Analysis on Iranian wind catcher and its effect on natural ventilation as a solution towards sustainable architecture (case study: Yazd). Special Journal of the World Academy of Science, Engineering and Technology. V. 54, p. 574-579, 2009. Disponível em: <<http://www.waset.org/journals/waset/v54/v54-101.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2010.

ZHANG, A.; GU, M. Wind tunnel tests and numerical simulations of wind pressures on buildings in staggered arrangement. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 96, n. 10-11, p. 2067-2079, Oct. 2008.

Sites

<<http://www.dailymail.co.uk/news/article-1236269/MPs-creche-400-000-cost-taxpayer.htm>>. (Acesso em: 19 jan. 2012)

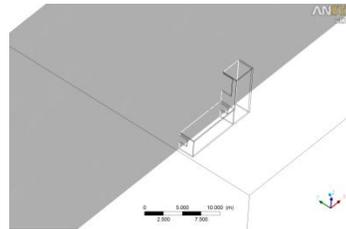
<<http://simran090901.wordpress.com/>>. (Acesso em: 19 jan. 2012)

APÊNDICES

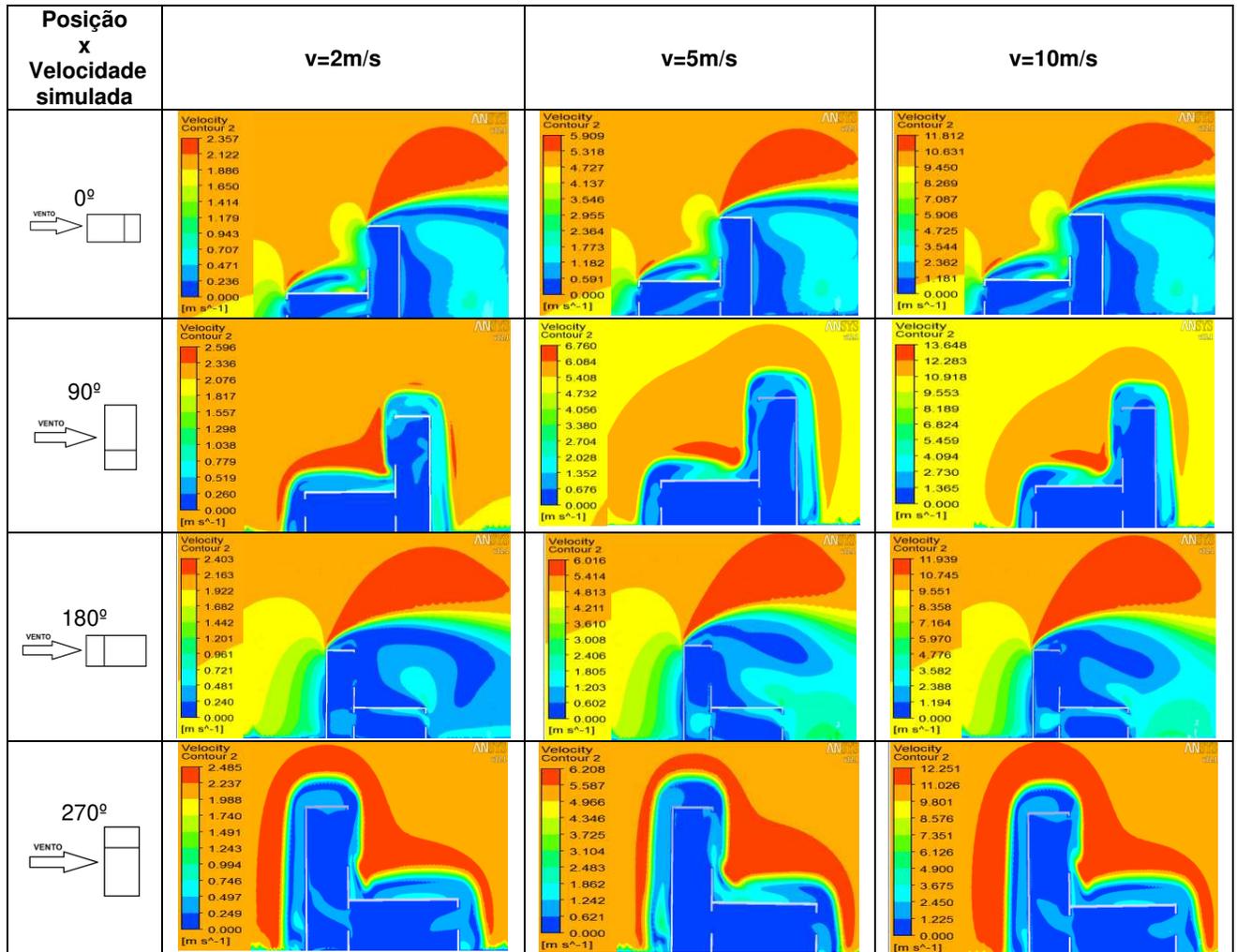
Apêndice A

Imagens de contorno de velocidade obtidas por meio do software CFX Post®

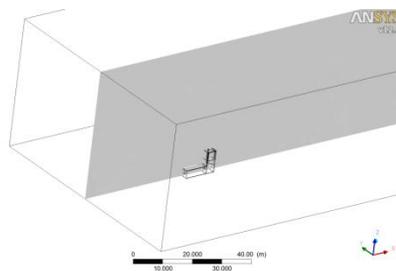
Torre Unidirecional



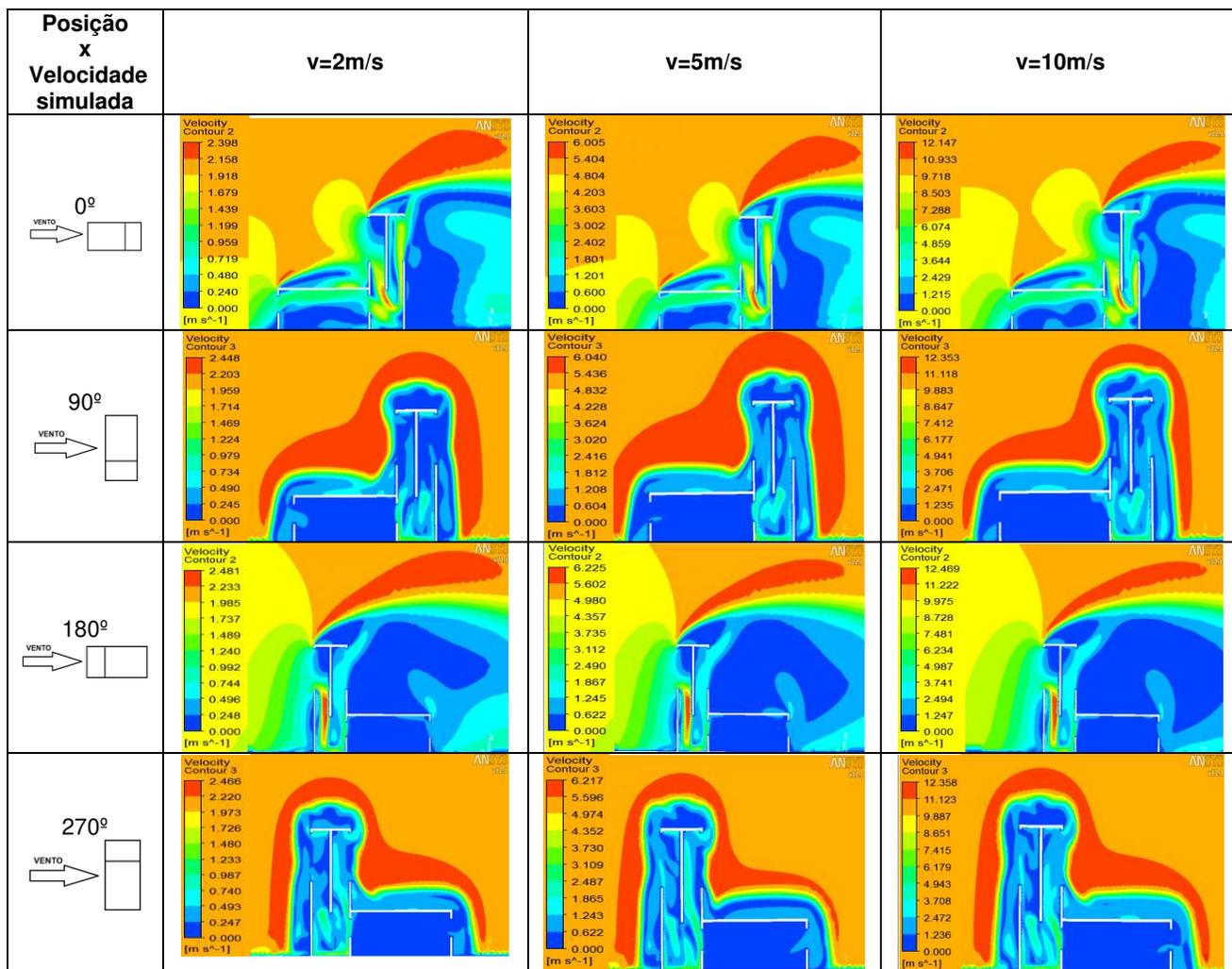
Plano de Visualização



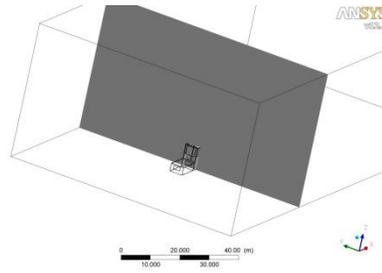
Torre Tetradirecional



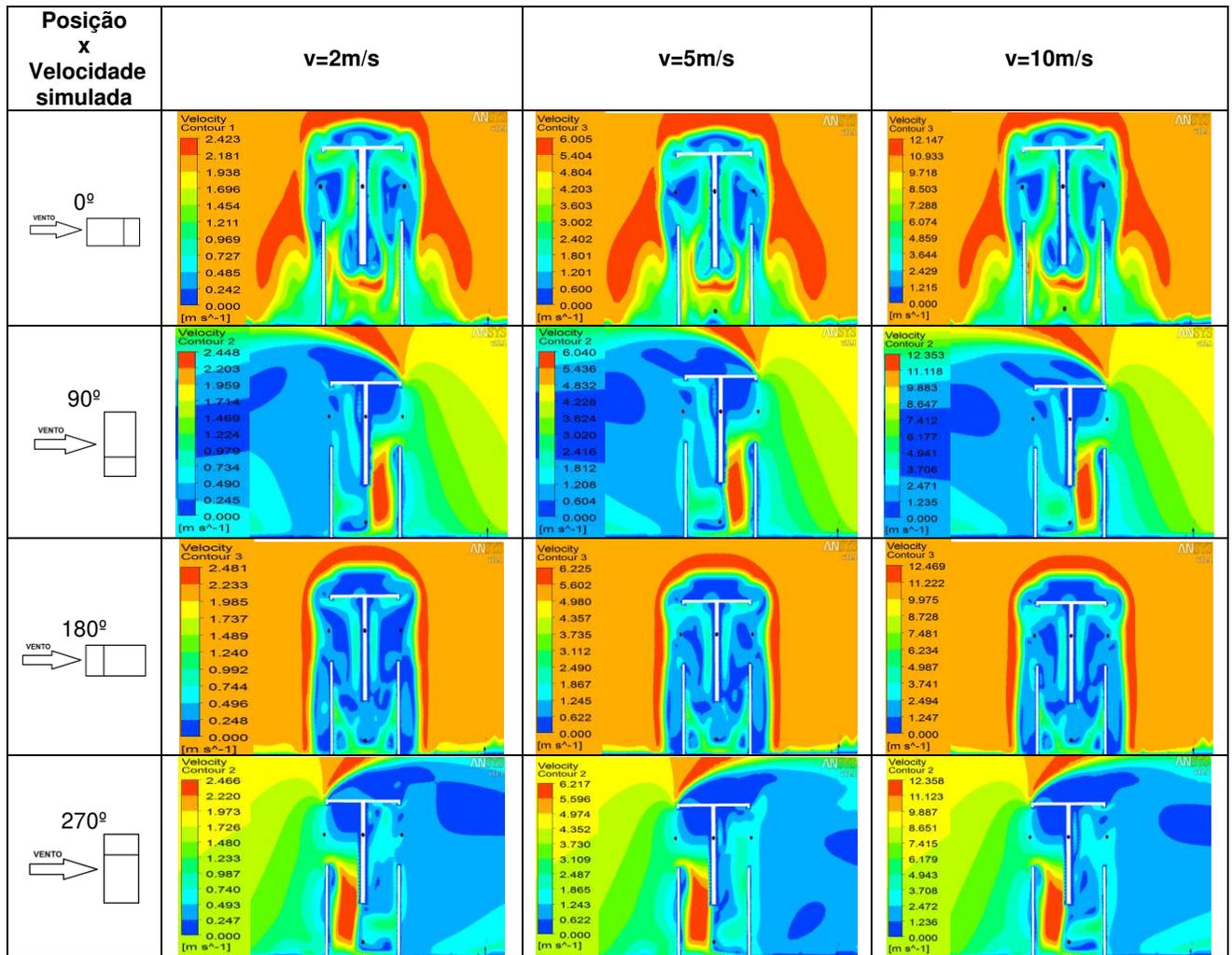
Plano de Visualização



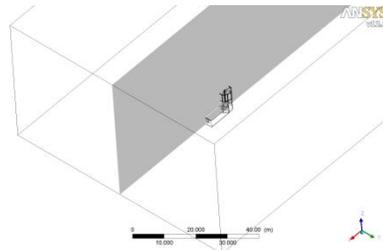
Torre Tetradirecional



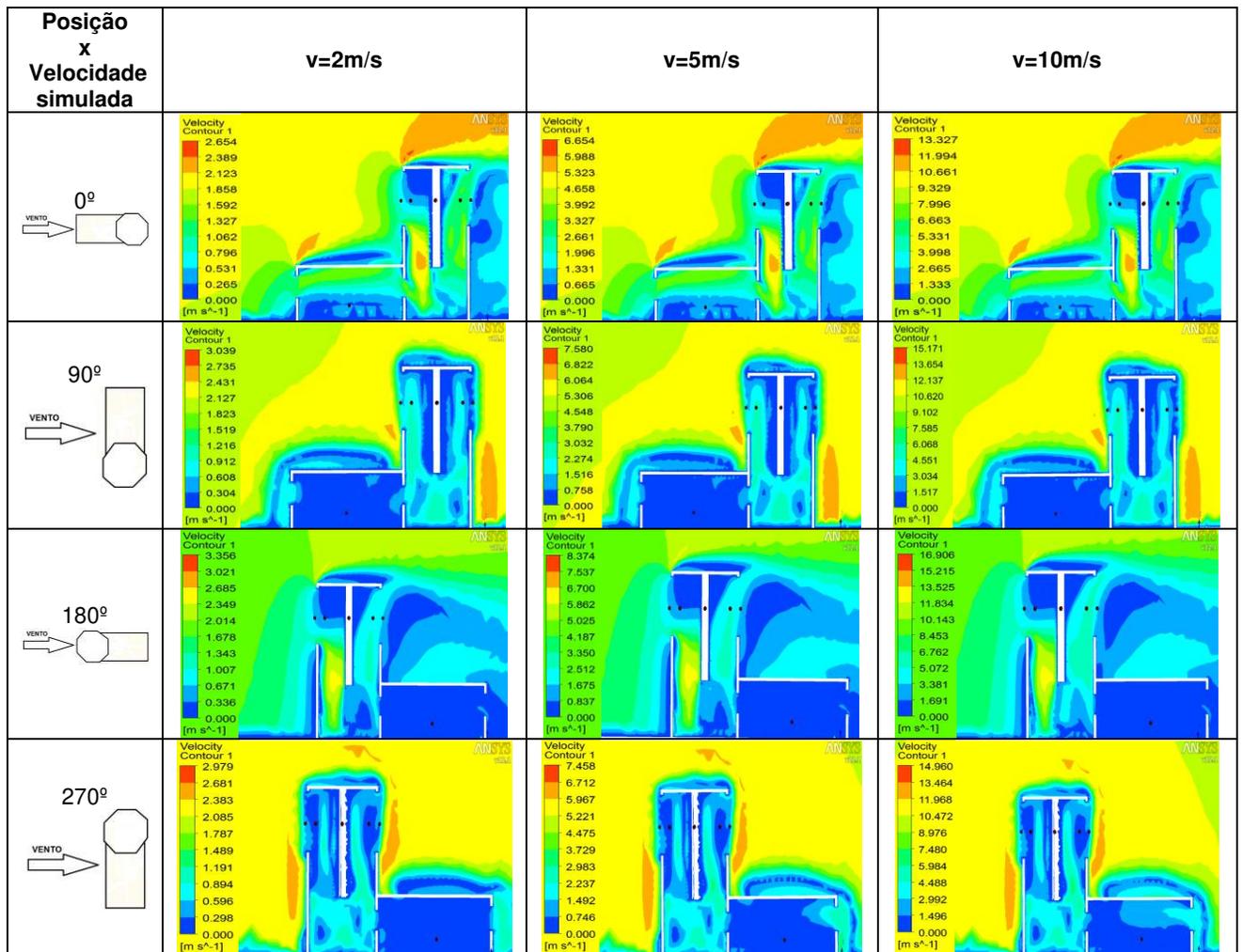
Plano de Visualização



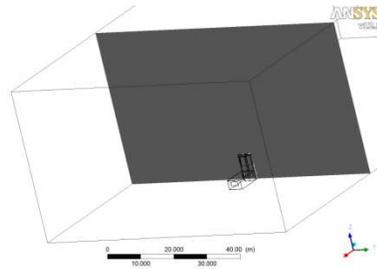
Torre Octodirecional



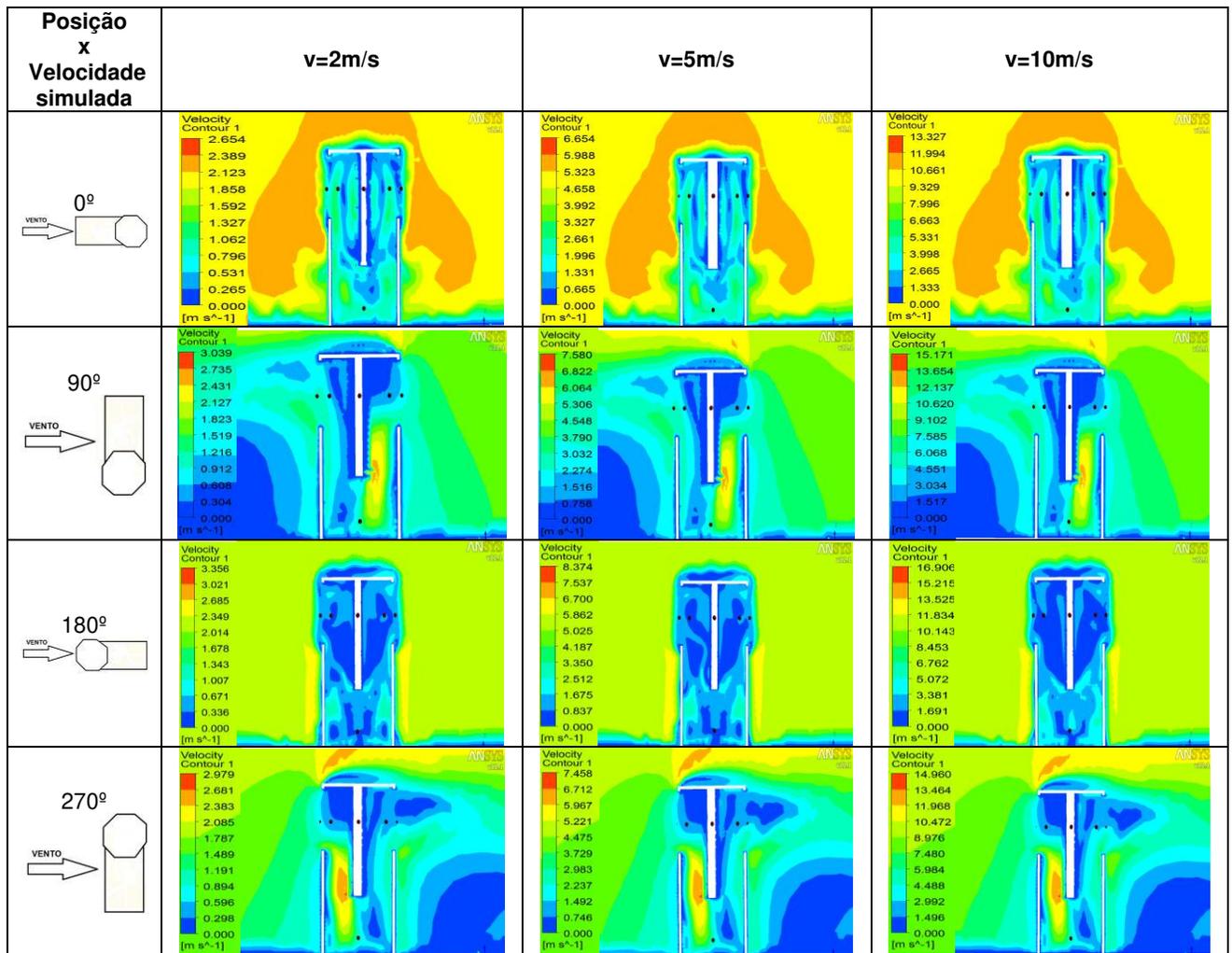
Plano de Visualização



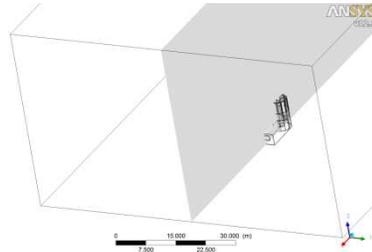
Torre Octodirecional



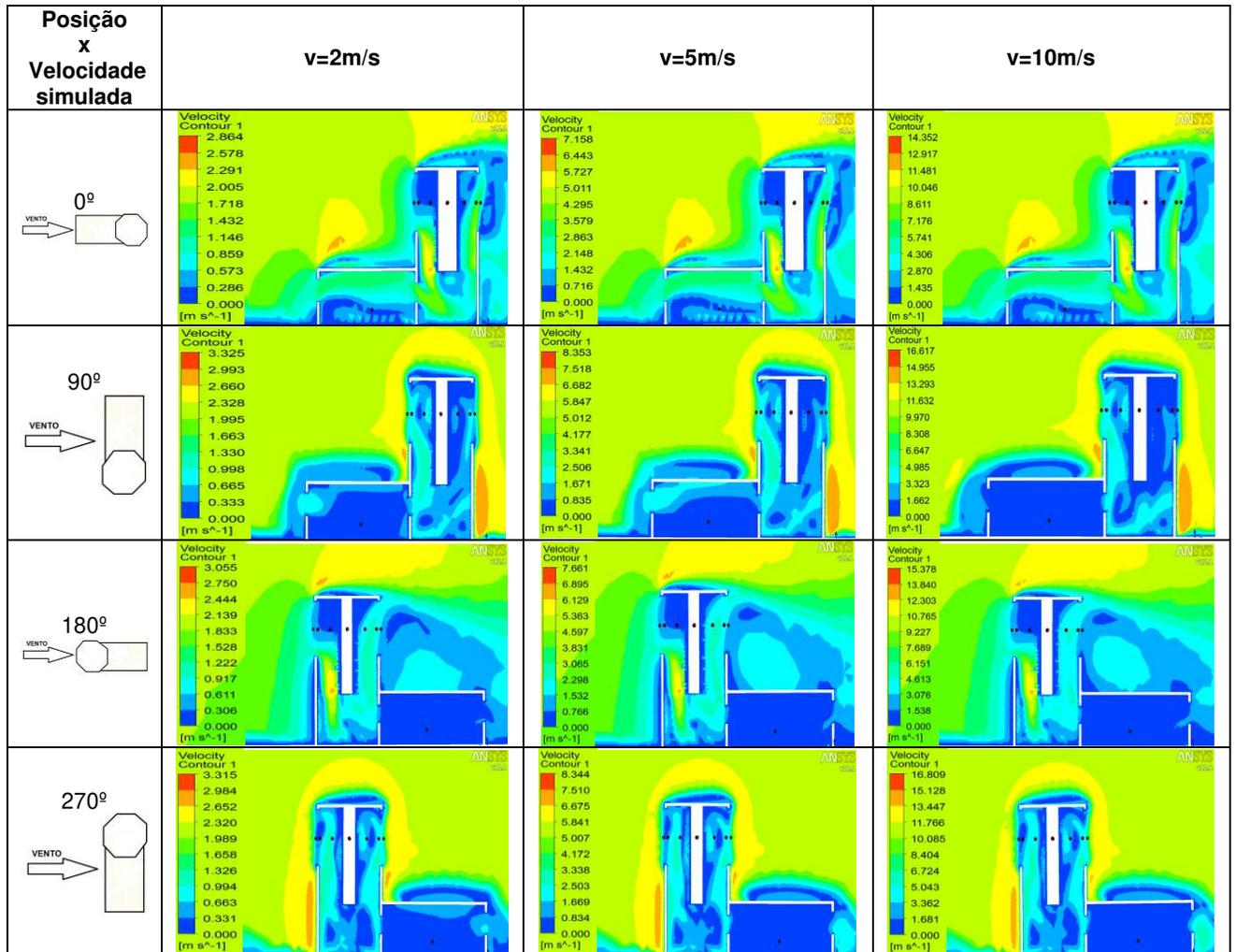
Plano de Visualização



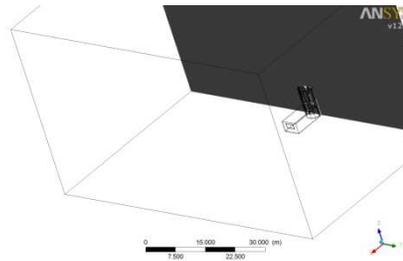
Torre Dodecadirecional



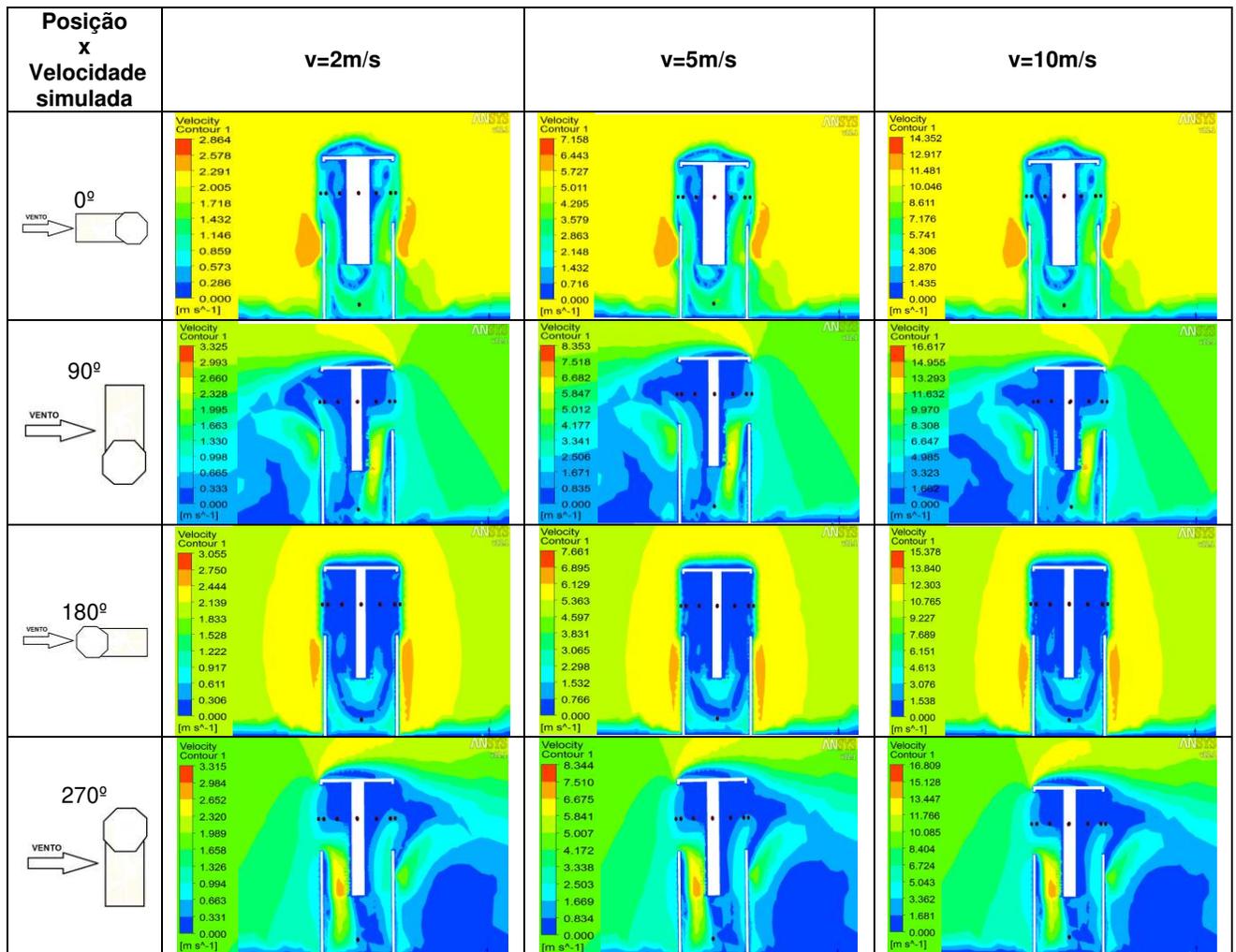
Plano de Visualização



Torre Dodecadirecional



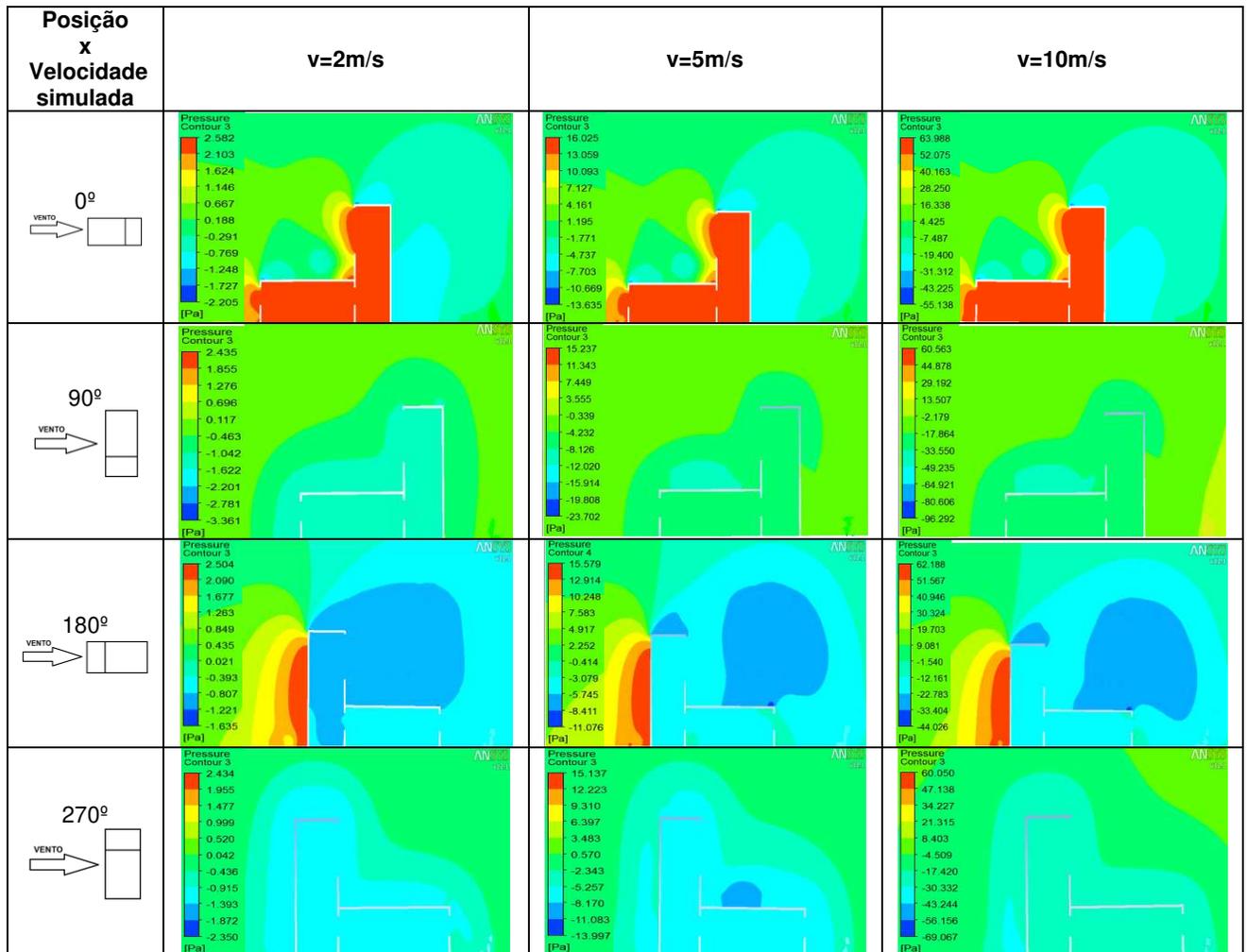
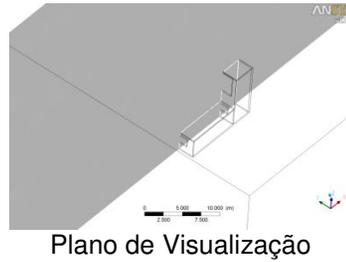
Plano de Visualização



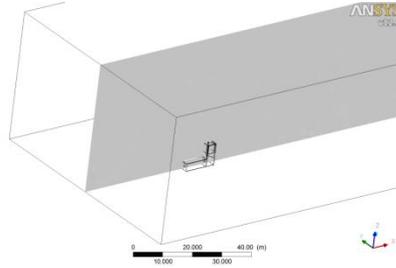
Apêndice B

Imagens de contorno de pressão obtidas por meio do software CFX Post®

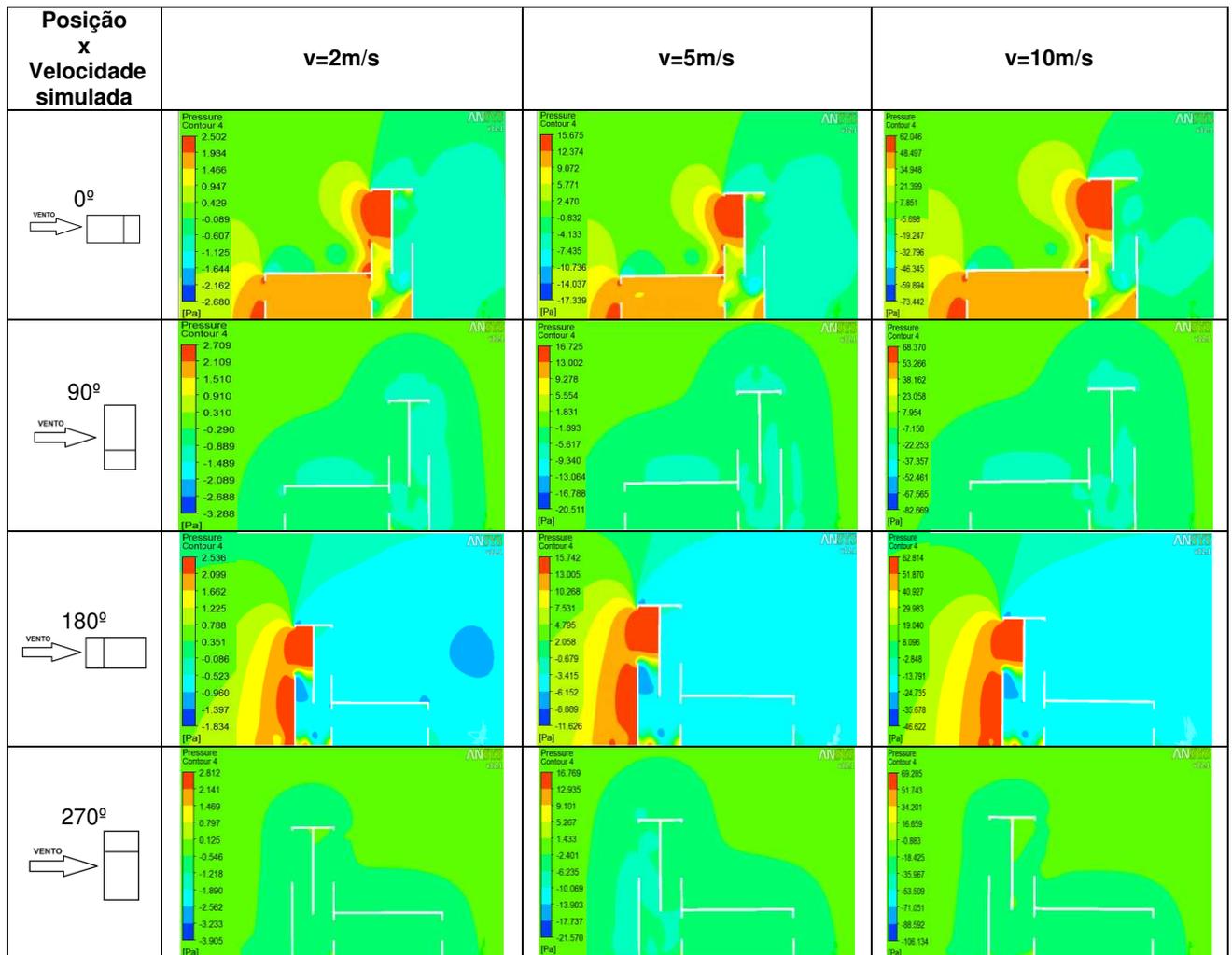
Torre Unidirecional



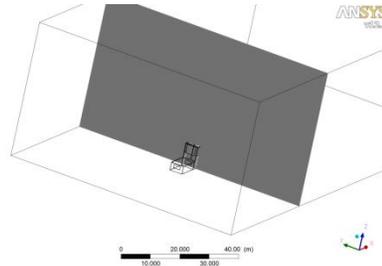
Torre Tetradirecional



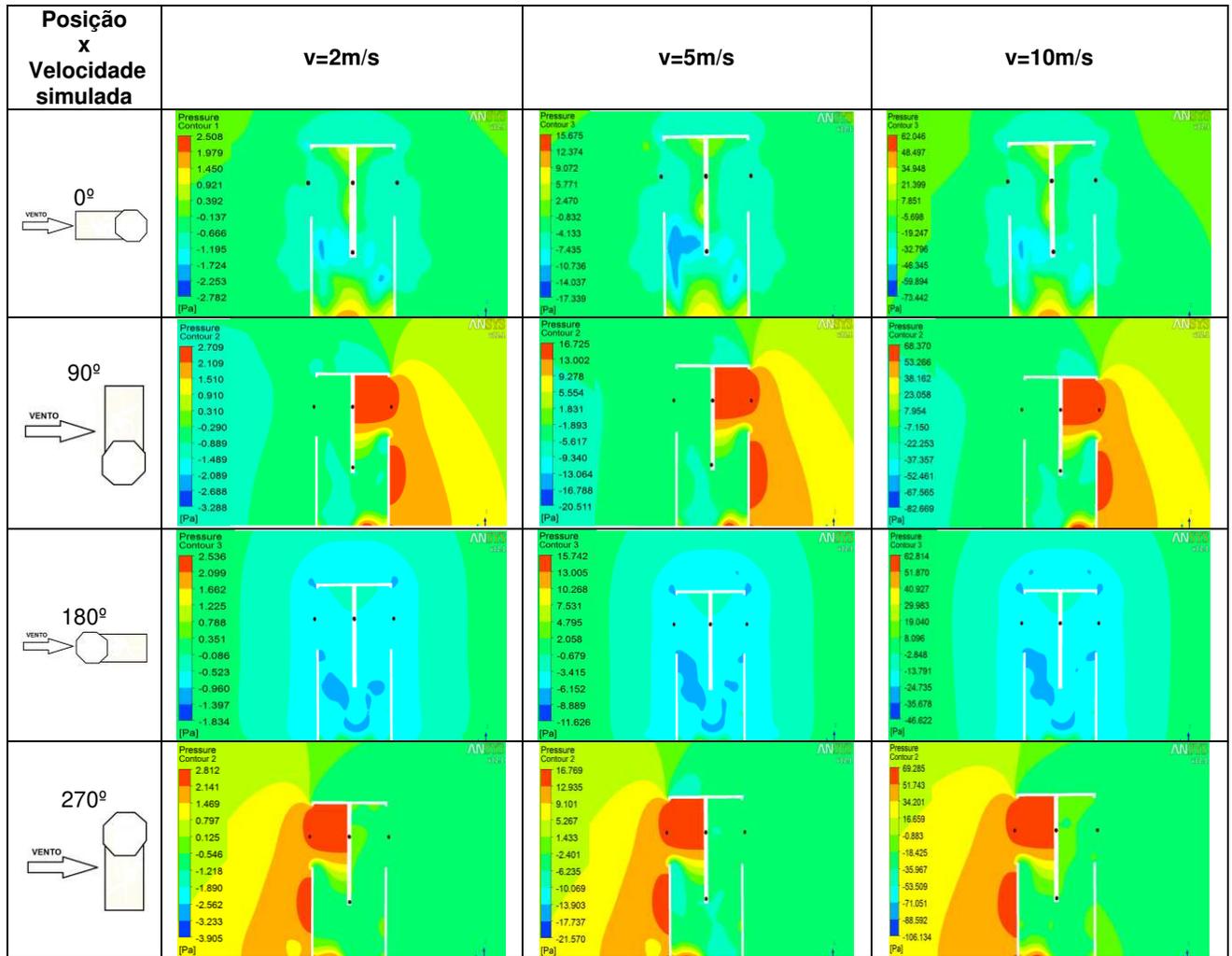
Plano de Visualização



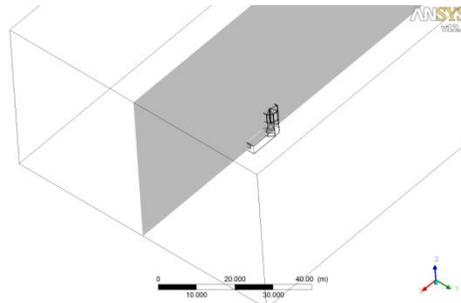
Torre Tetrádirecional



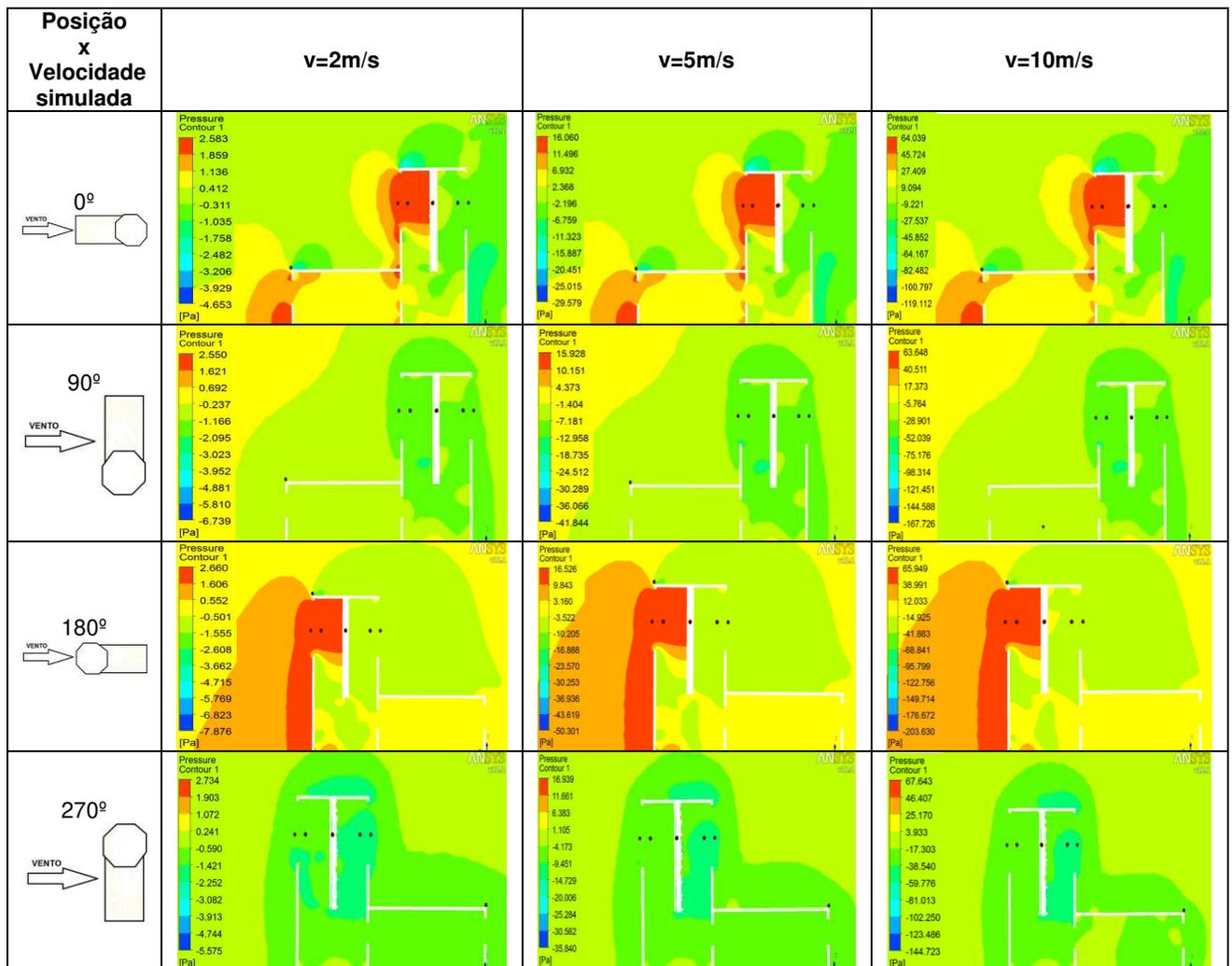
Plano de Visualização



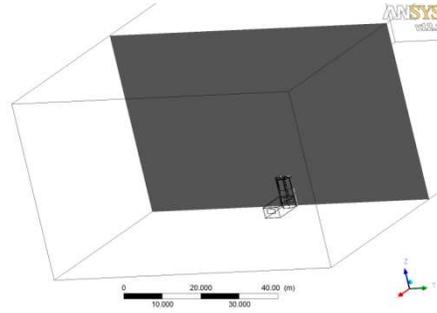
Torre Octodirecional



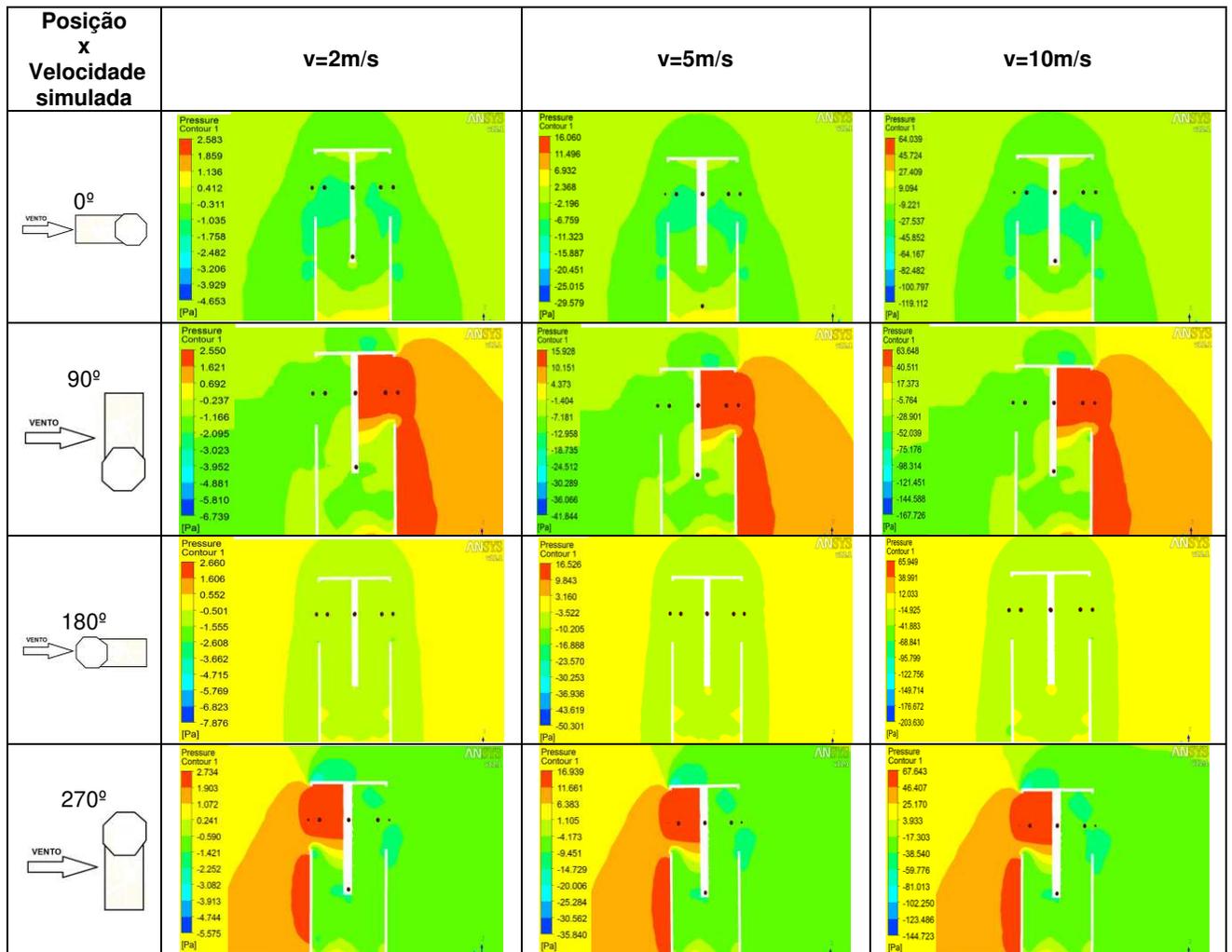
Plano de Visualização



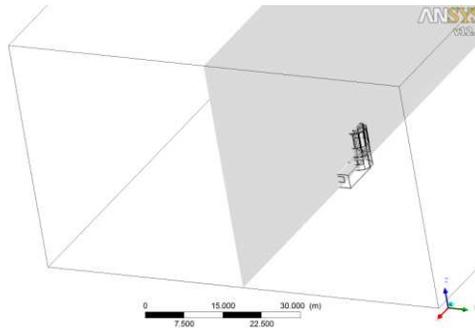
Torre Octodirecional



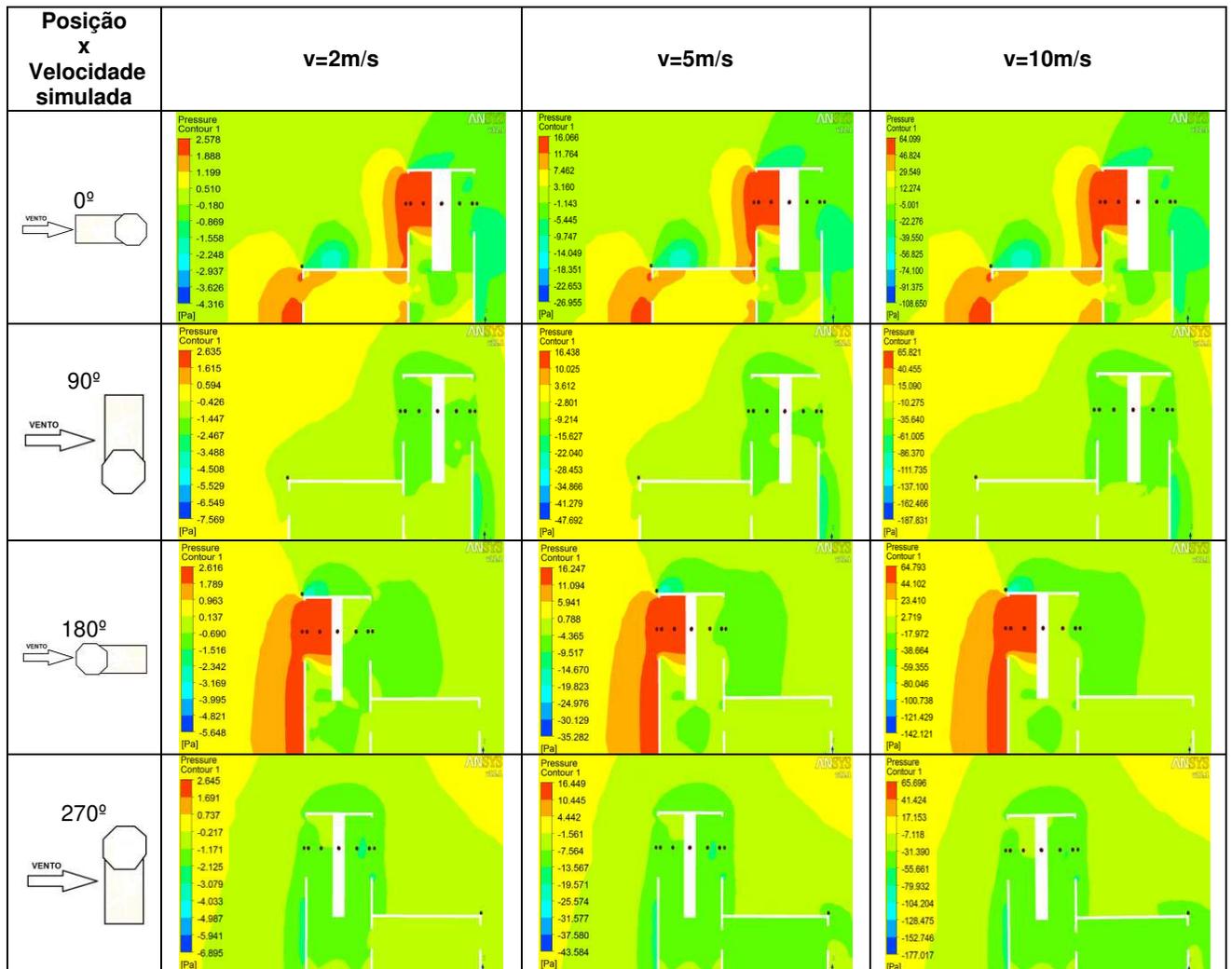
Plano de Visualização



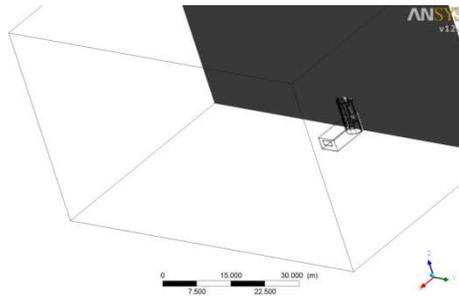
Torre Dodecadirecional



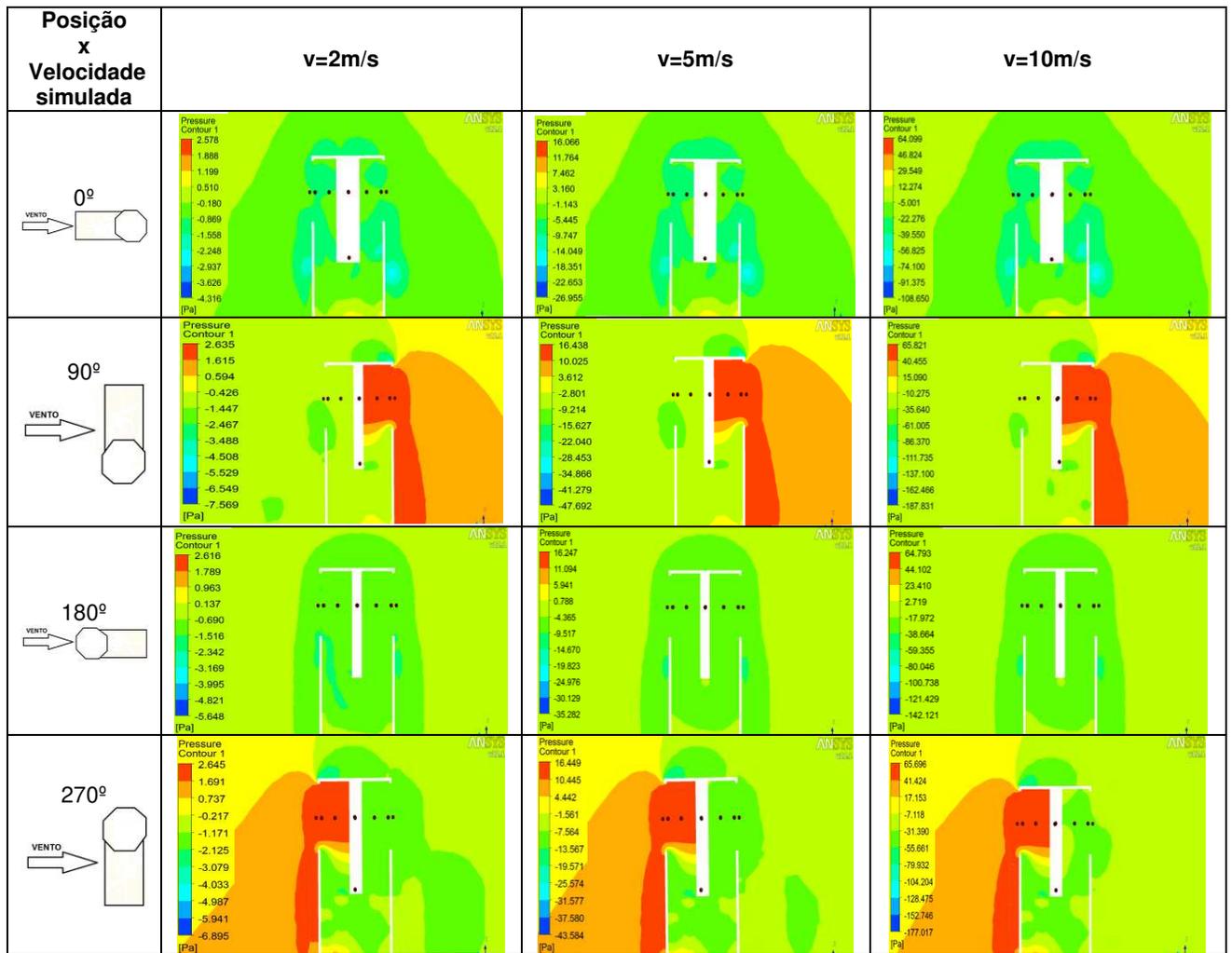
Plano de Visualização



Torre Dodecadirecional



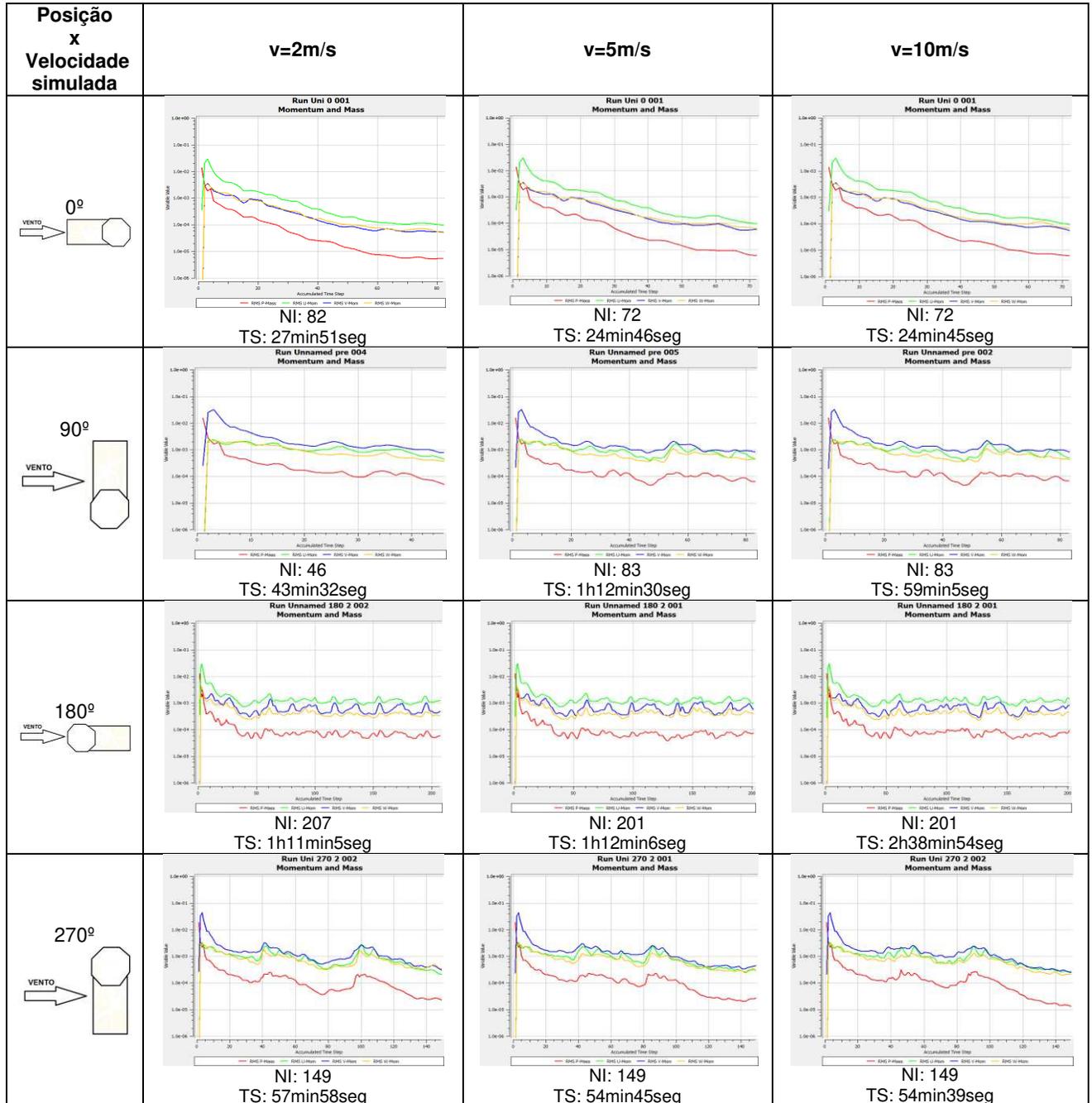
Plano de Visualização



Apêndice C

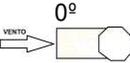
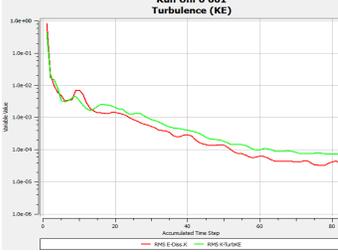
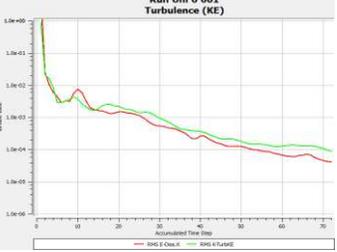
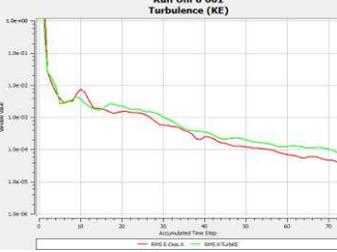
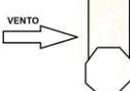
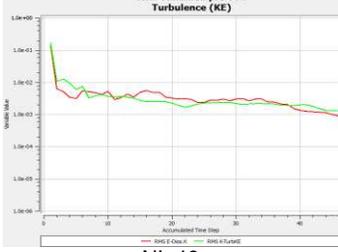
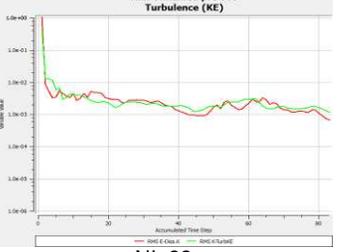
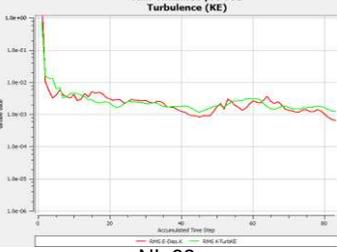
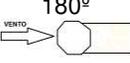
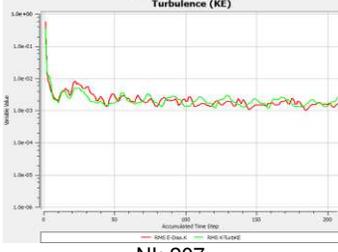
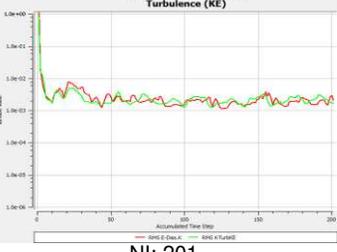
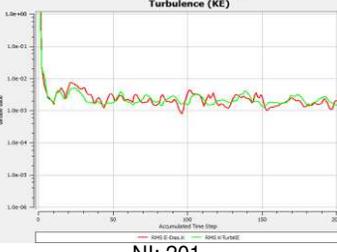
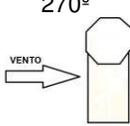
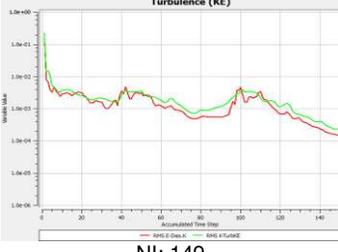
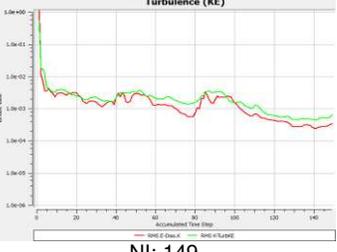
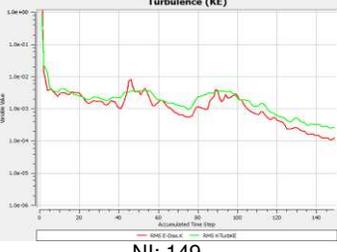
Momento, Massa e Turbulência obtidos por meio do software CFX[®]

Torre Unidirecional: Momento e Massa



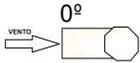
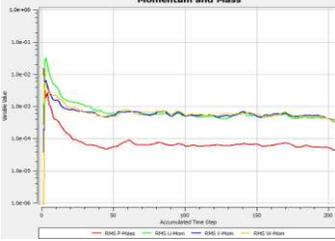
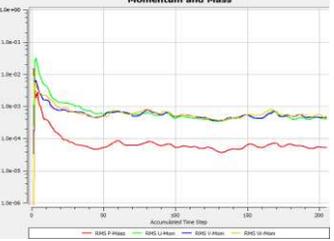
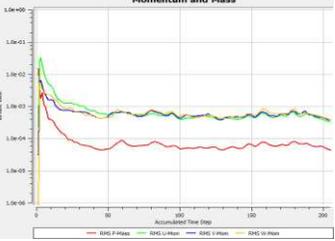
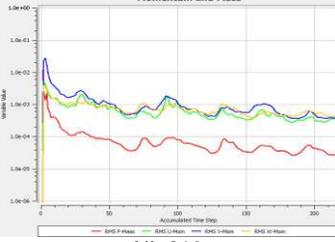
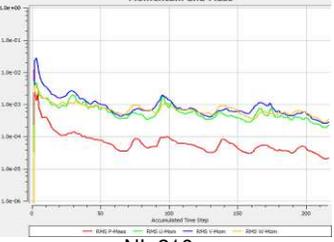
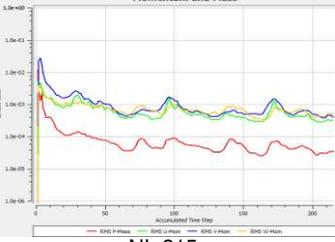
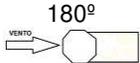
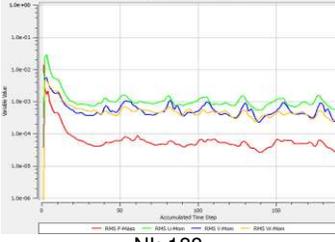
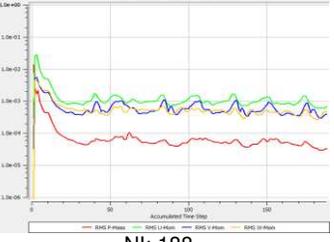
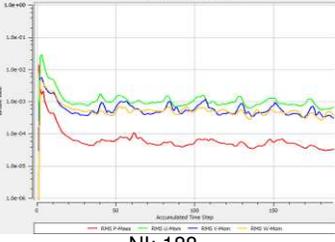
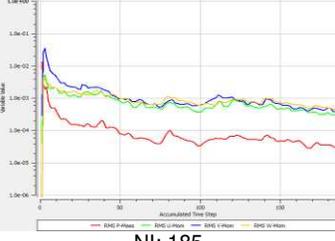
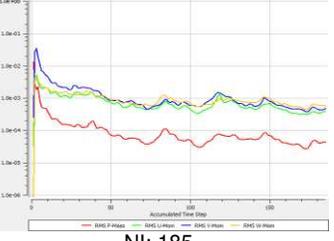
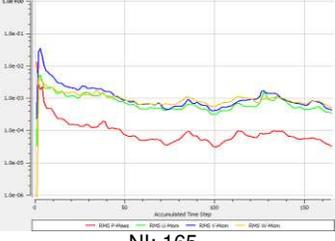
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Unidirecional: Turbulência

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 0 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 82 TS: 27min51seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 0 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 72 TS: 24min46seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 0 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 72 TS: 24min45seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed pra 004 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 46 TS: 43min32seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed pra 005 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 83 TS: 1h12min30seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed pra 002 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 83 TS: 59min5seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 180 2 002 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 207 TS: 1h11min5seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 180 2 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 201 TS: 1h12min6seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 180 2 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 201 TS: 2h38min54seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 270 2 002 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 149 TS: 57min58seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 270 2 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 149 TS: 54min45seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Uni 270 2 002 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 149 TS: 54min39seg</p>

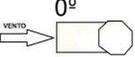
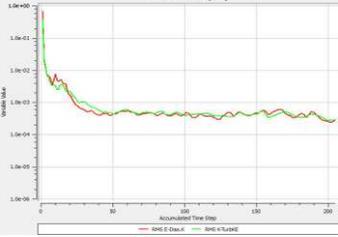
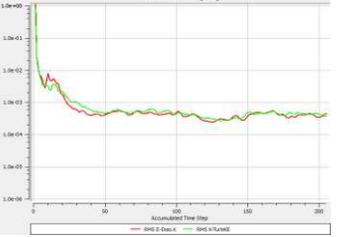
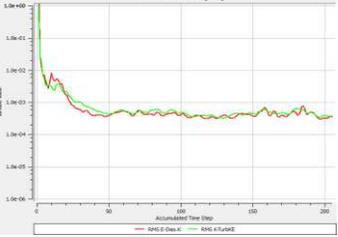
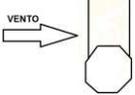
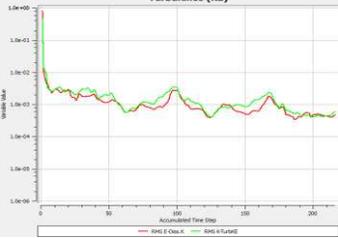
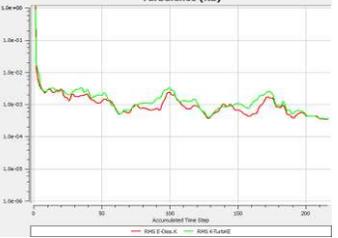
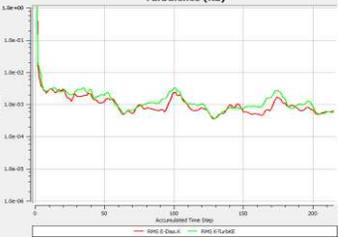
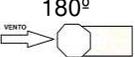
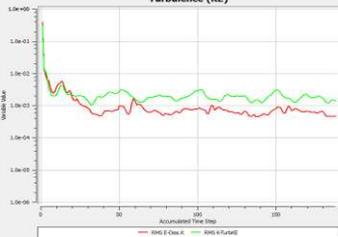
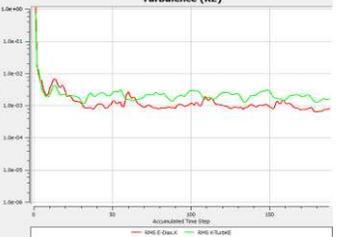
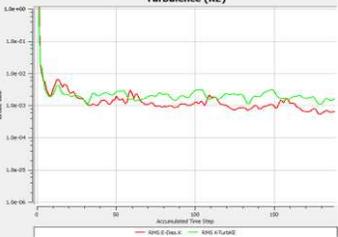
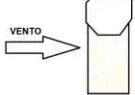
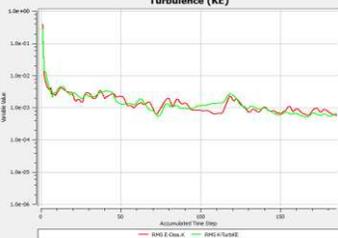
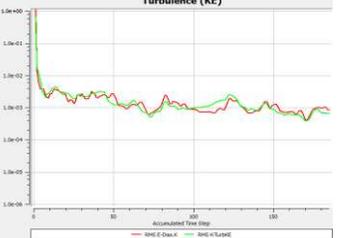
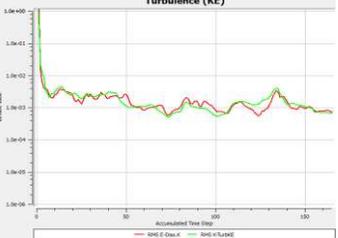
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Tetradirecional: Momento e Massa

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 003 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h10min10seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h2min44seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h2min49seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 003 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 216 TS: 4h32min41seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 216 TS: 56min41seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 215 TS: 56min52seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 004 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 53min55seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 51min34seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 51min9seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 002 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 185 TS: 58min12seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 185 TS: 58min38seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed.def270 002 Momentum and Mass</p>  <p style="text-align: center;">NI: 165 TS: 58min58seg</p>

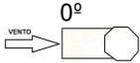
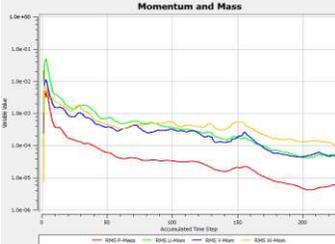
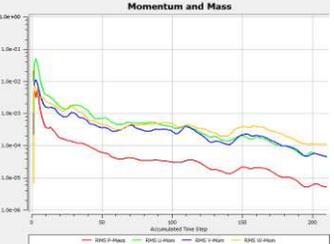
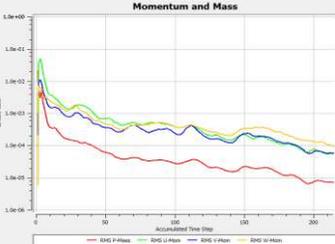
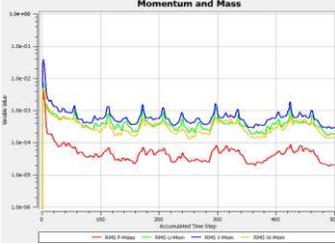
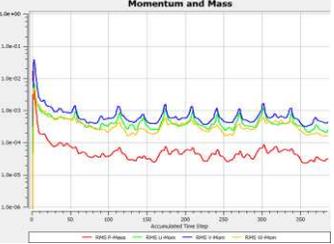
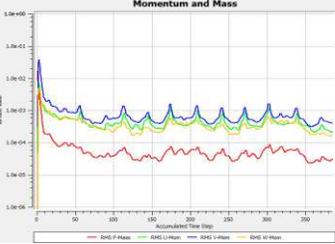
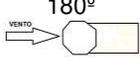
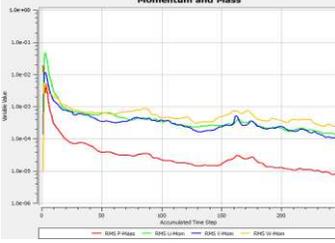
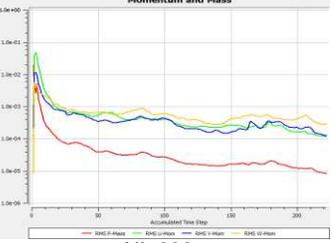
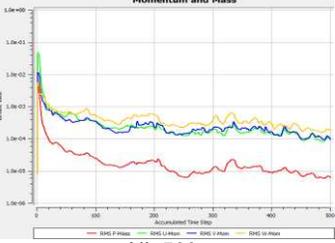
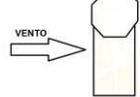
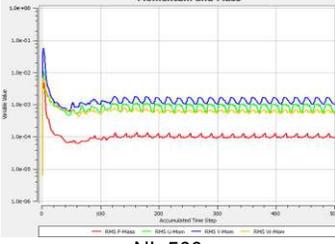
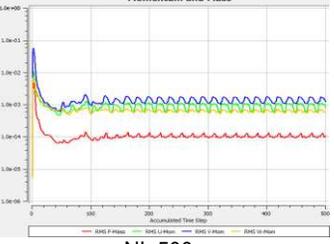
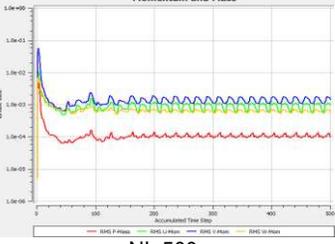
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Tetradirecional: Turbulência

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 003 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h10min10seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h2min44seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 0 2 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 205 TS: 1h2min49seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 003 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 216 TS: 4h32min41seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 216 TS: 56min41seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Tetra 90 2 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 215 TS: 56min52seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 004 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 53min55seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 51min34seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 188 TS: 51min9seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 002 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 185 TS: 58min12seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 185 TS: 58min38seg</p>	<p style="text-align: center;">Run Unnamed.def270 002 Turbulence (KE)</p>  <p style="text-align: center;">NI: 165 TS: 58min58seg</p>

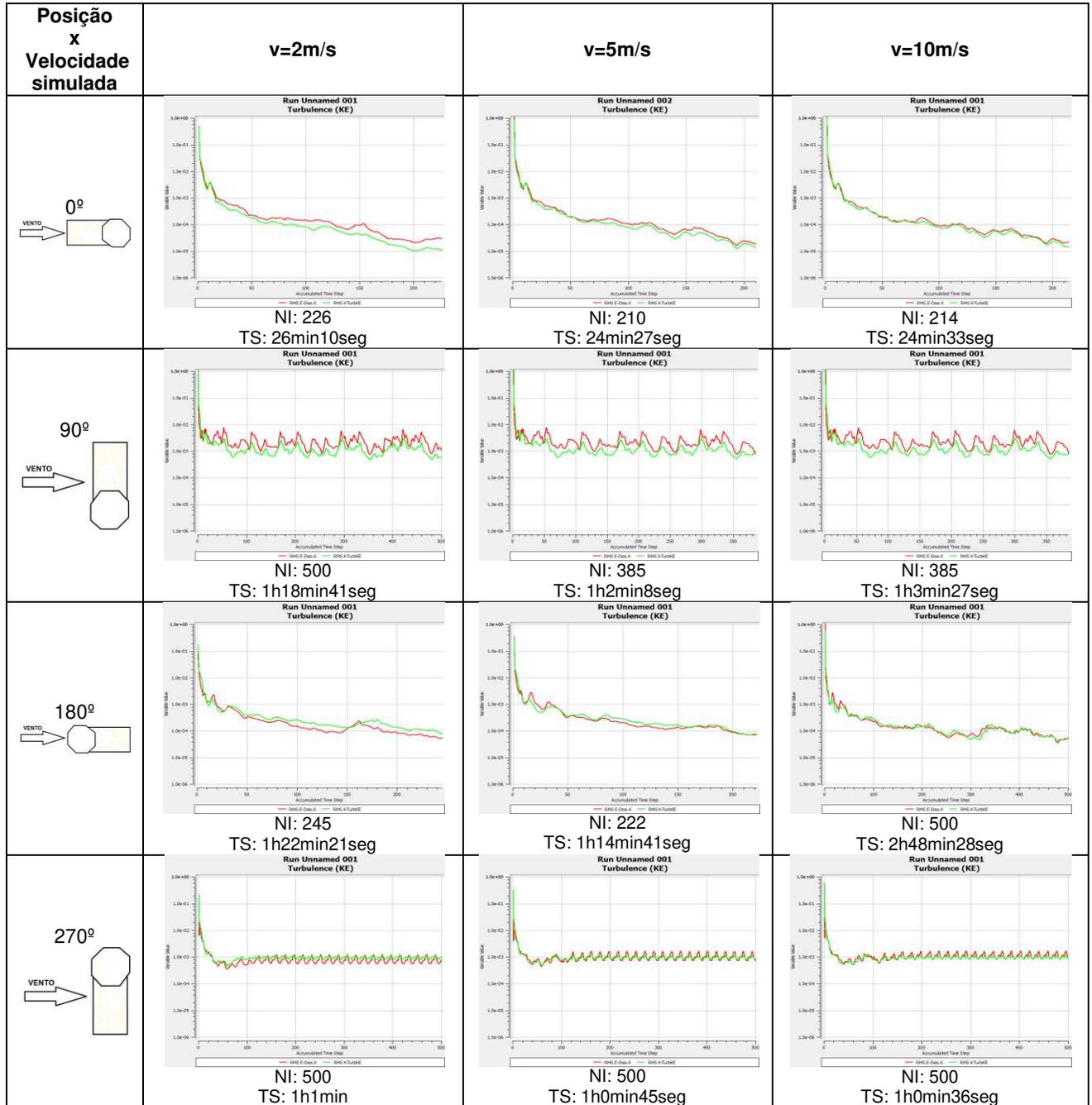
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Octodirecional: Momento e Massa

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 226 TS: 26min10seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 210 TS: 24min27seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 214 TS: 24min33seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h18min41seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 385 TS: 1h2min8seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 385 TS: 1h3min27seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 245 TS: 1h22min21seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 222 TS: 1h14min41seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 2h48min28seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h1min</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h0min45seg</p>	 <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h0min36seg</p>

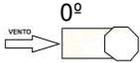
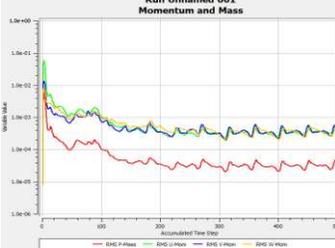
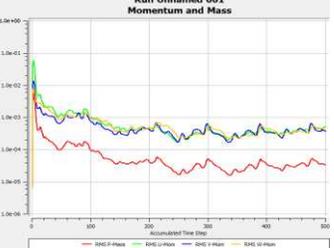
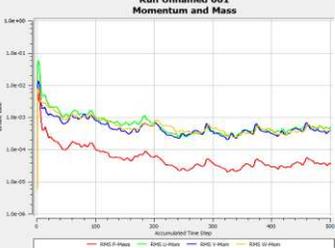
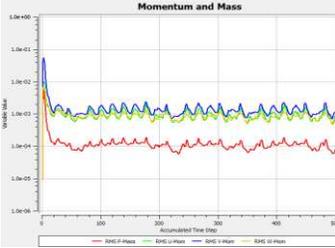
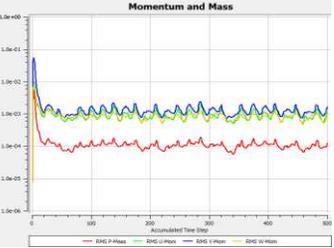
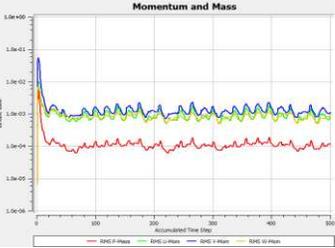
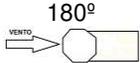
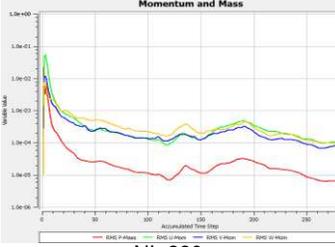
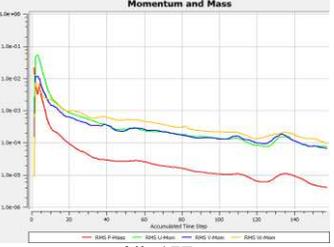
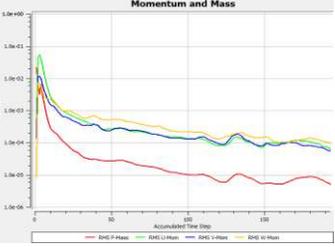
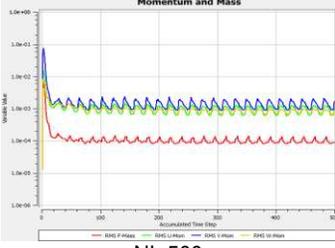
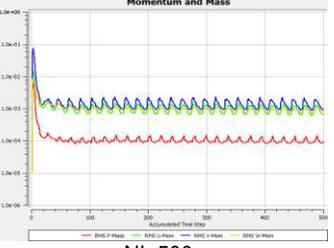
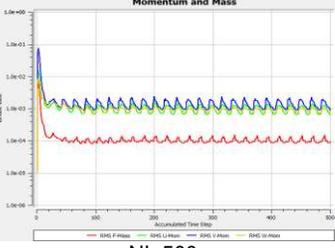
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Octodirecional: Turbulência



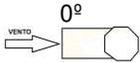
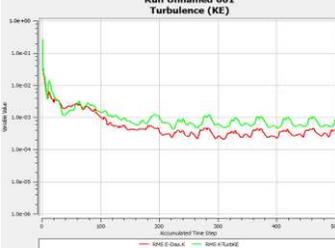
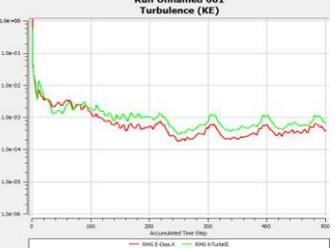
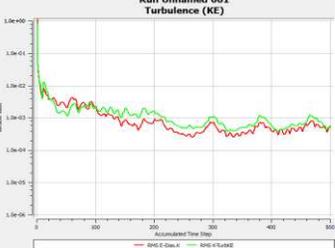
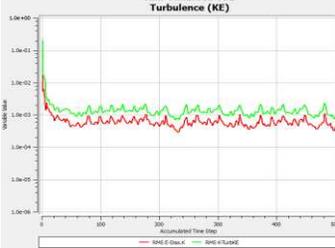
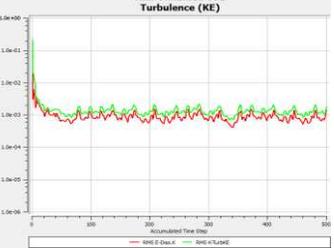
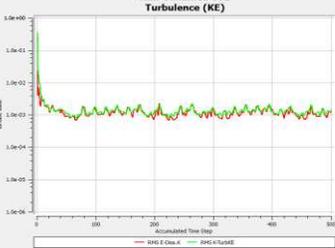
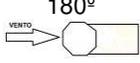
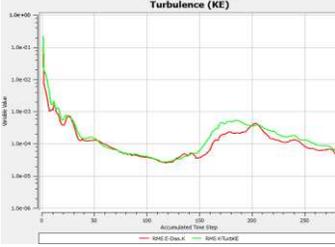
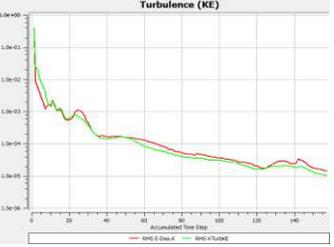
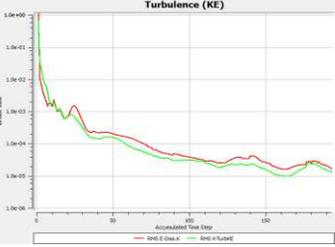
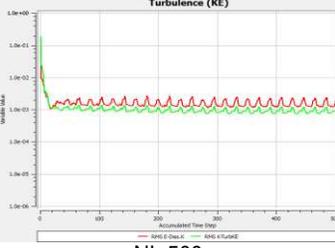
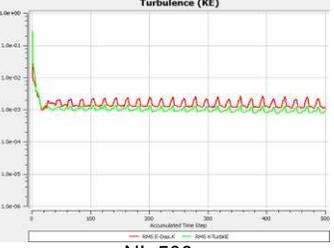
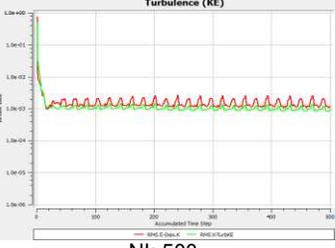
NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Dodecadirecional: Momento e Massa

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h6min21seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 2h11min54seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h6min33seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h9min6seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h8min40seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h8min47seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 280 TS: 31min54seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 157 TS: 17min50seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 193 TS: 21min59seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h14min11seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h13min37seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Momentum and Mass</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h13min48seg</p>

NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Torre Dodecadirecional: Turbulência

Posição x Velocidade simulada	v=2m/s	v=5m/s	v=10m/s
 <p style="text-align: center;">0°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h6min21seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 2h11min54seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h6min33seg</p>
 <p style="text-align: center;">90°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h9min6seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h8min40seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h8min47seg</p>
 <p style="text-align: center;">180°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 280 TS: 31min54seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 157 TS: 17min50seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 193 TS: 21min59seg</p>
 <p style="text-align: center;">270°</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h14min11seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h13min37seg</p>	 <p style="text-align: center;">Run Unnamed 001 Turbulence (KE)</p> <p style="text-align: center;">NI: 500 TS: 1h13min48seg</p>

NI: Número de Iterações
TS: Tempo de Simulação

Apêndice D

Exemplo de arquivo de resultados obtido por meio do software CFX®

This run of the CFX-12.1 Solver started at 17:26:12 on 17 May 2013 by user Administrador on PEDRO-PC (intel_xeon64.sse2_winnt) using the command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v121\CFX\bin\perl1lib\cfx5solve.pl" -def  
C:/Users/Administrador/Downloads/Uni_90/2ms/Unnamed_pre.def -file-comms  
tmp.monitor-ccl
```

Setting up CFX Solver run ...

```
+-----+  
|                                             |  
|               CFX Command Language for Run               |  
|                                             |  
+-----+
```

LIBRARY:

```
MATERIAL: Air at 25 C  
Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)  
Material Group = Air Data, Constant Property Gases  
Option = Pure Substance  
Thermodynamic State = Gas  
PROPERTIES:  
Option = General Material  
EQUATION OF STATE:  
Density = 1.185 [kg m-3]  
Molar Mass = 28.96 [kg kmol-1]  
Option = Value  
END  
SPECIFIC HEAT CAPACITY:  
Option = Value  
Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg-1 K-1]  
Specific Heat Type = Constant Pressure  
END  
REFERENCE STATE:  
Option = Specified Point  
Reference Pressure = 1 [atm]  
Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]  
Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]  
Reference Temperature = 25 [C]  
END  
DYNAMIC VISCOSITY:  
Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m-1 s-1]  
Option = Value  
END  
THERMAL CONDUCTIVITY:  
Option = Value  
Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m-1 K-1]  
END  
ABSORPTION COEFFICIENT:  
Absorption Coefficient = 0.01 [m-1]  
Option = Value  
END  
SCATTERING COEFFICIENT:  
Option = Value  
Scattering Coefficient = 0.0 [m-1]  
END
```

```

    REFRACTIVE INDEX:
      Option = Value
      Refractive Index = 1.0 [m m^-1]
    END
    THERMAL EXPANSIVITY:
      Option = Value
      Thermal Expansivity = 0.003356 [K^-1]
    END
  END
END
FLOW: Flow Analysis 1
  SOLUTION UNITS:
    Angle Units = [rad]
    Length Units = [m]
    Mass Units = [kg]
    Solid Angle Units = [sr]
    Temperature Units = [K]
    Time Units = [s]
  END
  ANALYSIS TYPE:
    Option = Steady State
  EXTERNAL SOLVER COUPLING:
    Option = None
  END
  DOMAIN: Default Domain
    Coord Frame = Coord 0
    Domain Type = Fluid
    Location = FLUID0
  BOUNDARY: Default Domain Default
    Boundary Type = WALL
    Location = LATERAL_DOM_1,LATERAL_DOM_2,TETO_DOM
  BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No Slip wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth wall
    END
  END
  BOUNDARY: INLET
    Boundary Type = INLET
    Location = INLET
  BOUNDARY CONDITIONS:
    FLOW REGIME:
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Normal Speed = 2 [m s^-1]
      Option = Normal Speed
    END
    TURBULENCE:
      Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
    END
  END
  BOUNDARY: OUTLET
    Boundary Type = OUTLET
    Location = OUTLET

```

```

BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Average Static Pressure
    Pressure Profile Blend = 0.05
    Relative Pressure = 0 [Pa]
  END
  PRESSURE AVERAGING:
    Option = Average Over whole outlet
  END
END
END
BOUNDARY: PISO DOM
  Boundary Type = WALL
  Location = CHAO_DOM
  BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No slip wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth wall
    END
  END
END
END
BOUNDARY: TETOS
  Boundary Type = WALL
  Location = TETO_ED,TETO_T
  BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = Free slip wall
    END
  END
END
END
BOUNDARY: VERTICAIS
  Boundary Type = WALL
  Location = \

BARLAVENTO_ED,BARLAVENTO_T,LATERAL_T_2,SOTAVENTO_ED,SOTAVENTO_T,LATER\
AL_T_1,LATERAL_ED_1
  BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No slip wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth wall
    END
  END
END
END
DOMAIN MODELS:
  BUOYANCY MODEL:
    Option = Non Buoyant
  END
  DOMAIN MOTION:
    Option = Stationary
  END
  MESH DEFORMATION:
    Option = None
  END
  REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 1 [atm]
  END
END
END

```

```

FLUID DEFINITION: Fluid 1
  Material = Air at 25 C
  Option = Material Library
MORPHOLOGY:
  Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID MODELS:
  COMBUSTION MODEL:
    Option = None
  END
  HEAT TRANSFER MODEL:
    Fluid Temperature = 25 [C]
    Option = Isothermal
  END
  THERMAL RADIATION MODEL:
    Option = None
  END
  TURBULENCE MODEL:
    Option = k epsilon
  END
  TURBULENT WALL FUNCTIONS:
    Option = Scalable
  END
END
END
OUTPUT CONTROL:
  RESULTS:
    File Compression Level = Default
    Option = Standard
  END
END
SOLVER CONTROL:
  Turbulence Numerics = First Order
  ADVECTION SCHEME:
    Option = High Resolution
  END
  CONVERGENCE CONTROL:
    Length Scale Option = Conservative
    Maximum Number of Iterations = 46
    Minimum Number of Iterations = 1
    Timescale Control = Auto Timescale
    Timescale Factor = 1.0
  END
  CONVERGENCE CRITERIA:
    Residual Target = 1.E-4
    Residual Type = RMS
  END
  DYNAMIC MODEL CONTROL:
    Global Dynamic Model Control = On
  END
END
END
COMMAND FILE:
  Version = 12.1
  Results Version = 12.1
END
SIMULATION CONTROL:
  EXECUTION CONTROL:
    EXECUTABLE SELECTION:
      Double Precision = Off
    END
  END

```

```

INTERPOLATOR STEP CONTROL:
  Runtime Priority = Standard
END
PARALLEL HOST LIBRARY:
  HOST DEFINITION: pedropc
  Remote Host Name = PEDRO-PC
  Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%v\CFX
  Host Architecture String = winnt-amd64
END
PARTITIONER STEP CONTROL:
  Multidomain Option = Independent Partitioning
  Runtime Priority = Standard
  PARTITIONING TYPE:
    MeTiS Type = k-way
    Option = MeTiS
    Partition Size Rule = Automatic
END
RUN DEFINITION:
  Solver Input File = \
  C:\Users\Administrador\Downloads\Uni_90\2ms\Unnamed_pre.def
  Run Mode = Full
END
SOLVER STEP CONTROL:
  Runtime Priority = Standard
  PARALLEL ENVIRONMENT:
    Start Method = Serial
END
END
END
END

```

```

+-----+
| solver |
+-----+

```

```

+-----+
| ANSYS CFX solver 12.1 |
| Version 2009.10.14-23.08 Thu Oct 15 00:45:24 GMTDT 2009 |
| Executable Attributes |
| single-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-supfort-noprof-nos |
| Copyright 2009 ANSYS Inc. |
+-----+

```

```

+-----+
| Job Information |
+-----+

```

```

Run mode:      serial run
Host computer: PEDRO-PC
Job started:   Fri May 17 17:26:18 2013

```

```

+-----+
| Memory Allocated for Run (Actual usage may be less) |
+-----+

```

Data Type	Kwords	words/Node	words/Elem	Kbytes	Bytes/Node
Real	301613.4	376.83	64.70	1178177.2	1507.31
Integer	117077.0	146.27	25.11	457331.8	585.09
Character	3444.8	4.30	0.74	3364.0	4.30
Logical	65.0	0.08	0.01	253.9	0.32
Double	608.0	0.76	0.13	4750.0	6.08

```

+-----+
| Mesh Statistics |
+-----+

```

Domain Name	Orthog. Angle	Exp. Factor	Aspect Ratio
	Minimum [deg]	Maximum	Maximum
Default Domain	45.5 ok	19 ok	4 OK
	%! %ok %OK	%! %ok %OK	%! %ok %OK
Default Domain	0 <1 100	0 3 97	0 0 100

Domain Name : Default Domain

```

Total Number of Nodes           =      800401
Total Number of Elements        =     4661966
  Total Number of Tetrahedrons   =     4661966
Total Number of Faces           =      78170

```

```

+-----+
| Average Scale Information |
+-----+

```

```

Domain Name : Default Domain
Global Length           = 9.0347E+01
Minimum Extent          = 4.8900E+01
Maximum Extent          = 1.7476E+02
Density                 = 1.1850E+00
Dynamic Viscosity       = 1.8310E-05
Velocity                = 2.0000E+00
Advection Time          = 4.5174E+01
Reynolds Number         = 1.1694E+07

```

```

+-----+
| Checking for Isolated Fluid Regions |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
| The Equations Solved in This Calculation |
+-----+

```

Subsystem : Momentum and Mass

```

U-Mom
V-Mom

```

W-Mom
P-Mass

Subsystem : TurbKE and Diss.K

K-TurbKE
E-Diss.K

CFD Solver started: Fri May 17 17:26:44 2013

Convergence History

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 1 CPU SECONDS = 1.234E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.00	2.4E-08	5.5E-06	3.3E+02	ok
V-Mom	0.00	2.6E-04	7.4E-03	1.7E-01	ok
W-Mom	0.00	1.1E-08	4.7E-06	3.5E+02	ok
P-Mass	0.00	1.6E-02	2.9E-01	8.5 5.6E-02	OK
K-TurbKE	0.00	1.7E-01	4.5E-01	5.4 4.3E-07	OK
E-Diss.K	0.00	1.4E-01	7.9E-01	12.7 3.8E-08	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 2 CPU SECONDS = 8.578E+01

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	99.99	2.1E-03	8.4E-02	2.6E-02	OK
V-Mom	99.99	2.6E-02	3.5E-01	1.6E-02	OK
W-Mom	99.99	2.0E-03	9.9E-02	2.4E-02	OK
P-Mass	0.18	2.8E-03	1.6E-01	12.2 5.5E-02	OK
K-TurbKE	0.07	1.1E-02	2.1E-01	5.4 2.8E-04	OK
E-Diss.K	0.05	6.6E-03	5.4E-01	12.7 1.6E-07	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 3 CPU SECONDS = 1.499E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.15	2.5E-03	1.8E-01	7.4E-02	OK
V-Mom	1.26	3.2E-02	5.5E-01	3.1E-02	OK

W-Mom	1.09	2.1E-03	1.6E-01	8.5	7.0E-02	OK
P-Mass	0.60	1.7E-03	7.1E-02		3.7E-02	OK
K-TurbKE	1.19	1.3E-02	5.7E-01	5.4	8.2E-03	OK
E-Diss.K	0.79	5.2E-03	2.6E-01	12.8	9.3E-06	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 4 CPU SECONDS = 2.119E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	0.77	1.9E-03	1.3E-01	8.6E-02	OK	
V-Mom	0.58	1.9E-02	4.3E-01	3.4E-02	OK	
W-Mom	0.99	2.1E-03	2.8E-01	8.1E-02	OK	
P-Mass	1.17	2.0E-03	3.5E-02	8.5	3.8E-02	
K-TurbKE	0.75	9.6E-03	3.2E-01	5.4	1.0E-02	OK
E-Diss.K	0.67	3.4E-03	2.6E-01	18.7	7.1E-06	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 5 CPU SECONDS = 2.748E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	0.85	1.6E-03	1.3E-01	2.2E-01	ok	
V-Mom	0.57	1.1E-02	4.2E-01	1.3E-01	ok	
W-Mom	0.87	1.8E-03	2.4E-01	2.2E-01	ok	
P-Mass	0.35	6.8E-04	2.4E-02	4.7	6.6E-02	
K-TurbKE	0.63	6.1E-03	4.8E-01	5.4	6.3E-03	OK
E-Diss.K	0.93	3.2E-03	3.4E-01	18.8	2.9E-05	OK

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 6 CPU SECONDS = 3.356E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	1.03	1.7E-03	1.1E-01	9.3E-02	OK	
V-Mom	0.69	7.3E-03	4.0E-01	4.9E-02	OK	
W-Mom	1.04	1.9E-03	1.8E-01	8.1E-02	OK	
P-Mass	0.84	5.7E-04	4.8E-02	8.5	5.0E-02	
K-TurbKE	1.27	7.7E-03	5.7E-01	5.4	5.5E-03	OK
E-Diss.K	1.69	5.4E-03	4.5E-01	24.7	2.1E-05	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 7 CPU SECONDS = 3.991E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.15	1.9E-03	1.3E-01	9.1E-02	OK
V-Mom	0.97	7.1E-03	4.1E-01	5.4E-02	OK
W-Mom	1.06	2.0E-03	2.1E-01	8.7E-02	OK
P-Mass	0.95	5.4E-04	4.5E-02	8.5	6.6E-02 OK
K-TurbKE	0.43	3.3E-03	2.8E-01	5.4	8.1E-03 OK
E-Diss.K	0.95	5.2E-03	3.2E-01	24.7	6.4E-05 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 8 CPU SECONDS = 4.632E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.04	2.0E-03	1.4E-01	9.9E-02	OK
V-Mom	0.81	5.7E-03	2.9E-01	5.9E-02	OK
W-Mom	0.98	2.0E-03	2.0E-01	1.0E-01	OK
P-Mass	0.84	4.5E-04	4.1E-02	8.5	9.4E-02 OK
K-TurbKE	1.19	3.9E-03	2.4E-01	5.4	2.7E-02 OK
E-Diss.K	0.94	4.8E-03	3.2E-01	24.7	7.9E-05 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 9 CPU SECONDS = 5.271E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.07	2.1E-03	1.5E-01	4.7E-02	OK
V-Mom	0.91	5.2E-03	2.1E-01	3.6E-02	OK
W-Mom	0.99	2.0E-03	1.3E-01	5.2E-02	OK
P-Mass	1.01	4.5E-04	4.2E-02	12.2	5.1E-02 OK
K-TurbKE	1.08	4.2E-03	2.3E-01	5.4	9.1E-02 OK
E-Diss.K	0.88	4.3E-03	3.1E-01	18.8	1.1E-03 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 10 CPU SECONDS = 5.930E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.89	1.9E-03	1.2E-01	5.0E-02	OK
V-Mom	0.83	4.3E-03	1.6E-01	3.9E-02	OK
W-Mom	0.85	1.7E-03	1.4E-01	5.4E-02	OK
P-Mass	0.80	3.7E-04	2.7E-02	12.2	6.4E-02 OK
K-TurbKE	0.88	3.7E-03	2.1E-01	9.8	3.3E-02 OK
E-Diss.K	1.23	5.3E-03	8.6E-01	24.7	4.7E-04 OK

=====

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01

W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 11 CPU SECONDS = 6.603E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.79	1.5E-03	1.0E-01	5.0E-02	OK
V-Mom	0.83	3.6E-03	9.8E-02	3.9E-02	OK
W-Mom	0.87	1.5E-03	8.5E-02	5.1E-02	OK
P-Mass	0.85	3.1E-04	2.2E-02	12.2 7.0E-02	OK
K-TurbKE	0.93	3.4E-03	1.4E-01	9.8 2.3E-02	OK
E-Diss.K	0.57	3.0E-03	5.2E-01	24.7 2.7E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 12 CPU SECONDS = 7.277E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.99	1.5E-03	9.8E-02	5.0E-02	OK
V-Mom	0.90	3.2E-03	1.2E-01	3.8E-02	OK
W-Mom	1.10	1.6E-03	7.0E-02	4.9E-02	OK
P-Mass	0.96	3.0E-04	2.1E-02	12.2 7.6E-02	OK
K-TurbKE	1.10	3.8E-03	1.5E-01	5.4 9.8E-02	OK
E-Diss.K	1.13	3.4E-03	3.7E-01	24.7 3.7E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 13 CPU SECONDS = 7.935E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.10	1.6E-03	9.9E-02	5.5E-02	OK
V-Mom	0.92	2.9E-03	1.4E-01	3.7E-02	OK
W-Mom	0.97	1.6E-03	1.3E-01	5.1E-02	OK
P-Mass	0.91	2.7E-04	1.8E-02	12.2 8.4E-02	OK
K-TurbKE	0.92	3.5E-03	1.5E-01	5.4 9.9E-02	OK
E-Diss.K	1.28	4.3E-03	9.8E-01	24.7 3.7E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 14 CPU SECONDS = 8.591E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.11	1.8E-03	9.9E-02	6.3E-02	OK
V-Mom	0.97	2.9E-03	1.4E-01	3.2E-02	OK
W-Mom	0.93	1.4E-03	1.1E-01	5.8E-02	OK
P-Mass	1.10	3.0E-04	2.2E-02	12.2 8.1E-02	OK
K-TurbKE	0.94	3.3E-03	2.4E-01	9.7 1.8E-02	OK
E-Diss.K	0.80	3.5E-03	3.1E-01	24.6 3.3E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 15 CPU SECONDS = 9.210E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.96	1.7E-03	1.2E-01	6.3E-02	OK
V-Mom	0.86	2.5E-03	1.6E-01	3.1E-02	OK
W-Mom	0.99	1.4E-03	9.8E-02	6.6E-02	OK
P-Mass	1.03	3.1E-04	2.3E-02	12.2	7.9E-02 OK
K-TurbKE	0.85	2.8E-03	2.6E-01	9.7	1.8E-02 OK
E-Diss.K	1.45	5.0E-03	4.4E-01	24.6	3.3E-04 OK

=====

Timescale Information

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 16 CPU SECONDS = 9.744E+02

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.70	1.2E-03	7.9E-02	5.9E-02	OK
V-Mom	0.78	1.9E-03	8.4E-02	3.3E-02	OK
W-Mom	0.91	1.3E-03	7.4E-02	6.6E-02	OK
P-Mass	0.90	2.7E-04	2.1E-02	12.2	7.9E-02 OK
K-TurbKE	0.92	2.6E-03	1.2E-01	9.7	1.8E-02 OK
E-Diss.K	1.12	5.6E-03	5.1E-01	24.6	3.9E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 17 CPU SECONDS = 1.027E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.89	1.1E-03	6.2E-02	5.7E-02	OK
V-Mom	0.88	1.7E-03	8.6E-02	3.6E-02	OK
W-Mom	0.90	1.2E-03	6.3E-02	6.2E-02	OK
P-Mass	0.74	2.0E-04	1.8E-02	12.2	7.6E-02 OK
K-TurbKE	1.00	2.6E-03	9.3E-02	9.7	2.1E-02 OK
E-Diss.K	0.87	4.9E-03	4.7E-01	24.6	5.1E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 18 CPU SECONDS = 1.079E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.97	1.1E-03	7.0E-02	5.7E-02	OK
V-Mom	0.98	1.7E-03	8.7E-02	3.8E-02	OK
W-Mom	0.93	1.1E-03	6.0E-02	6.1E-02	OK
P-Mass	0.85	1.7E-04	1.6E-02	12.2	6.4E-02 OK

K-TurbKE	1.02	2.6E-03	8.4E-02	9.7	2.5E-02	OK
E-Diss.K	1.03	5.0E-03	5.0E-01	24.6	5.8E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 19 CPU SECONDS = 1.132E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	0.97	1.0E-03	1.0E-01	5.9E-02		OK
V-Mom	0.97	1.6E-03	9.1E-02	3.8E-02		OK
W-Mom	0.90	9.8E-04	7.3E-02	6.2E-02		OK
P-Mass	0.98	1.7E-04	1.5E-02	12.2	4.9E-02	OK
K-TurbKE	0.98	2.6E-03	8.1E-02	9.7	2.6E-02	OK
E-Diss.K	0.69	3.5E-03	3.9E-01	24.6	6.1E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 20 CPU SECONDS = 1.184E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	0.90	9.2E-04	4.5E-02	6.0E-02		OK
V-Mom	0.94	1.5E-03	9.3E-02	3.6E-02		OK
W-Mom	0.90	8.8E-04	8.1E-02	6.3E-02		OK
P-Mass	1.03	1.8E-04	1.5E-02	12.2	4.5E-02	OK
K-TurbKE	0.90	2.3E-03	7.1E-02	9.7	2.3E-02	OK
E-Diss.K	0.95	3.3E-03	3.8E-01	18.7	1.9E-03	OK

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 21 CPU SECONDS = 1.236E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	0.96	8.8E-04	5.5E-02	5.9E-02		OK
V-Mom	0.94	1.4E-03	8.6E-02	3.2E-02		OK
W-Mom	0.94	8.2E-04	7.6E-02	6.3E-02		OK
P-Mass	0.92	1.6E-04	1.5E-02	12.2	4.6E-02	OK
K-TurbKE	0.85	1.9E-03	6.3E-02	9.7	1.9E-02	OK
E-Diss.K	0.95	3.1E-03	1.9E-01	18.7	1.4E-03	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 22 CPU SECONDS = 1.289E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.07	9.4E-04	8.6E-02	5.8E-02	OK
V-Mom	0.96	1.4E-03	7.3E-02	2.8E-02	OK
W-Mom	0.91	7.5E-04	8.4E-02	6.4E-02	OK
P-Mass	0.90	1.5E-04	1.4E-02	12.2	4.9E-02 OK
K-TurbKE	0.88	1.7E-03	6.2E-02	9.7	1.7E-02 OK
E-Diss.K	1.03	3.2E-03	1.9E-01	18.7	1.3E-03 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 23 CPU SECONDS = 1.341E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.07	1.0E-03	6.2E-02	6.0E-02	OK
V-Mom	1.18	1.6E-03	1.6E-01	2.4E-02	OK
W-Mom	0.89	6.7E-04	3.7E-02	6.6E-02	OK
P-Mass	0.98	1.4E-04	1.5E-02	12.2	5.3E-02 OK
K-TurbKE	1.09	1.9E-03	6.6E-02	9.7	1.5E-02 OK
E-Diss.K	0.94	3.0E-03	2.1E-01	24.6	2.9E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 24 CPU SECONDS = 1.394E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.01	1.0E-03	7.7E-02	6.2E-02	OK
V-Mom	1.10	1.8E-03	1.7E-01	2.3E-02	OK
W-Mom	1.01	6.7E-04	3.5E-02	6.5E-02	OK
P-Mass	0.96	1.4E-04	1.2E-02	12.2	6.3E-02 OK
K-TurbKE	1.14	2.1E-03	8.6E-02	5.3	9.5E-02 OK
E-Diss.K	0.79	2.4E-03	1.9E-01	24.5	2.8E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 25 CPU SECONDS = 1.446E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.09	1.1E-03	1.1E-01	6.2E-02	OK
V-Mom	1.14	2.0E-03	2.1E-01	2.3E-02	OK
W-Mom	0.95	6.4E-04	6.0E-02	6.2E-02	OK
P-Mass	0.98	1.3E-04	1.4E-02	12.2	7.4E-02 OK
K-TurbKE	1.07	2.3E-03	8.0E-02	5.4	9.1E-02 OK
E-Diss.K	0.99	2.4E-03	2.3E-01	18.7	1.3E-03 OK

=====

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01

K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

```
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 26 CPU SECONDS = 1.498E+03

```
=====
```

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.19	1.3E-03	1.1E-01	5.5E-02	OK
V-Mom	1.01	2.0E-03	1.8E-01	2.2E-02	OK
W-Mom	1.08	6.9E-04	6.1E-02	5.8E-02	OK
P-Mass	1.07	1.4E-04	1.6E-02	12.2	7.4E-02 OK
K-TurbKE	0.99	2.3E-03	9.4E-02	5.4	9.7E-02 OK
E-Diss.K	1.20	2.8E-03	2.5E-01	18.7	1.1E-03 OK

```
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 27 CPU SECONDS = 1.550E+03

```
=====
```

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.03	1.4E-03	1.5E-01	4.9E-02	OK
V-Mom	0.87	1.8E-03	1.2E-01	2.3E-02	OK
W-Mom	1.02	7.0E-04	5.4E-02	6.7E-02	OK
P-Mass	1.11	1.6E-04	2.0E-02	12.2	6.4E-02 OK
K-TurbKE	1.04	2.4E-03	1.4E-01	9.7	1.5E-02 OK
E-Diss.K	1.00	2.8E-03	1.7E-01	18.7	8.9E-04 OK

```
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 28 CPU SECONDS = 1.602E+03

```
=====
```

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.83	1.1E-03	9.1E-02	5.1E-02	OK
V-Mom	0.81	1.4E-03	7.4E-02	2.7E-02	OK
W-Mom	0.94	6.6E-04	4.1E-02	8.2E-02	OK
P-Mass	0.78	1.2E-04	1.4E-02	12.2	5.4E-02 OK
K-TurbKE	1.04	2.5E-03	1.3E-01	9.7	1.4E-02 OK
E-Diss.K	1.09	3.1E-03	2.6E-01	18.7	8.4E-04 OK

```
=====
```

OUTER LOOP ITERATION = 29 CPU SECONDS = 1.655E+03

```
=====
```

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.85	9.6E-04	7.4E-02	5.3E-02	OK
V-Mom	0.93	1.3E-03	6.9E-02	3.4E-02	OK
W-Mom	0.95	6.3E-04	4.0E-02	8.4E-02	OK
P-Mass	0.81	1.0E-04	6.4E-03	12.2	5.3E-02 OK
K-TurbKE	0.97	2.4E-03	1.0E-01	5.4	1.0E-01 OK
E-Diss.K	0.87	2.7E-03	1.6E-01	18.7	9.3E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 30 CPU SECONDS = 1.707E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.87	8.3E-04	5.8E-02	4.9E-02	OK
V-Mom	0.92	1.2E-03	6.3E-02	3.5E-02	OK
W-Mom	0.95	6.0E-04	3.0E-02	7.3E-02	OK
P-Mass	0.95	9.5E-05	6.9E-03	12.2	5.9E-02 OK
K-TurbKE	0.94	2.2E-03	7.3E-02	9.7	1.4E-02 OK
E-Diss.K	1.16	3.1E-03	2.4E-01	18.7	8.6E-04 OK

=====

Timescale Information

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

=====

OUTER LOOP ITERATION = 31 CPU SECONDS = 1.760E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.99	8.2E-04	5.4E-02	4.8E-02	OK
V-Mom	0.94	1.2E-03	6.1E-02	2.9E-02	OK
W-Mom	0.99	5.9E-04	3.3E-02	7.2E-02	OK
P-Mass	0.98	9.3E-05	8.5E-03	12.2	5.9E-02 OK
K-TurbKE	0.93	2.1E-03	6.4E-02	5.3	9.2E-02 OK
E-Diss.K	1.03	3.2E-03	3.2E-01	18.7	9.2E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 32 CPU SECONDS = 1.812E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.01	8.3E-04	6.6E-02	4.7E-02	OK
V-Mom	1.10	1.3E-03	7.4E-02	2.8E-02	OK
W-Mom	1.00	6.0E-04	3.2E-02	7.6E-02	OK
P-Mass	1.23	1.1E-04	9.0E-03	12.2	5.8E-02 OK
K-TurbKE	1.01	2.1E-03	6.2E-02	5.3	8.8E-02 OK
E-Diss.K	0.86	2.7E-03	2.1E-01	18.7	9.5E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 33 CPU SECONDS = 1.864E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.16	9.6E-04	9.5E-02	4.4E-02	OK
V-Mom	1.10	1.4E-03	7.6E-02	3.0E-02	OK
W-Mom	1.04	6.2E-04	5.1E-02	6.6E-02	OK

P-Mass	1.31	1.5E-04	1.9E-02	12.2	6.1E-02	OK
K-TurbKE	1.04	2.2E-03	5.8E-02	5.3	9.2E-02	OK
E-Diss.K	1.13	3.1E-03	2.3E-01	18.7	9.7E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 34 CPU SECONDS = 1.916E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	1.00	9.7E-04	7.6E-02	3.9E-02	OK	
V-Mom	1.02	1.4E-03	8.8E-02	2.8E-02	OK	
W-Mom	1.14	7.1E-04	5.4E-02	5.3E-02	OK	
P-Mass	1.07	1.6E-04	2.0E-02	12.2	5.8E-02	
K-TurbKE	1.02	2.2E-03	5.5E-02	9.7	1.5E-02	OK
E-Diss.K	1.00	3.1E-03	3.0E-01	18.7	8.8E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 35 CPU SECONDS = 1.968E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	1.00	9.7E-04	5.1E-02	3.3E-02	OK	
V-Mom	1.07	1.5E-03	8.5E-02	2.5E-02	OK	
W-Mom	1.13	8.0E-04	3.2E-02	4.7E-02	OK	
P-Mass	0.99	1.6E-04	1.7E-02	12.2	5.0E-02	
K-TurbKE	0.95	2.1E-03	5.6E-02	9.7	1.4E-02	OK
E-Diss.K	0.80	2.5E-03	3.3E-01	18.7	8.3E-04	OK

=====

Timescale Information

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 36 CPU SECONDS = 2.021E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution		
U-Mom	1.04	1.0E-03	5.0E-02	3.5E-02	OK	
V-Mom	0.98	1.5E-03	7.9E-02	2.1E-02	OK	
W-Mom	0.81	6.5E-04	3.0E-02	6.1E-02	OK	
P-Mass	0.89	1.4E-04	1.8E-02	12.2	4.3E-02	
K-TurbKE	0.99	2.1E-03	5.9E-02	9.7	1.3E-02	OK
E-Diss.K	0.99	2.5E-03	2.8E-01	18.6	7.7E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 37 CPU SECONDS = 2.073E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.09	1.1E-03	1.4E-01	8.9E-02	OK
V-Mom	0.94	1.4E-03	9.3E-02	4.7E-02	OK
W-Mom	0.86	5.6E-04	3.7E-02	1.5E-01	ok
P-Mass	0.78	1.1E-04	1.0E-02	8.5	9.8E-02 OK
K-TurbKE	0.92	2.0E-03	4.6E-02	5.3	9.3E-02 OK
E-Diss.K	0.88	2.2E-03	2.7E-01	18.7	7.9E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 38 CPU SECONDS = 2.123E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.95	1.0E-03	1.7E-01	5.1E-02	OK
V-Mom	0.92	1.3E-03	1.1E-01	1.9E-02	OK
W-Mom	0.90	5.0E-04	2.6E-02	8.2E-02	OK
P-Mass	1.20	1.3E-04	1.9E-02	12.2	5.0E-02 OK
K-TurbKE	0.99	1.9E-03	6.2E-02	5.3	8.1E-02 OK
E-Diss.K	0.96	2.1E-03	2.3E-01	18.7	7.3E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 39 CPU SECONDS = 2.174E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.82	8.6E-04	8.1E-02	4.6E-02	OK
V-Mom	0.90	1.2E-03	8.7E-02	2.5E-02	OK
W-Mom	0.99	4.9E-04	2.0E-02	6.7E-02	OK
P-Mass	1.00	1.3E-04	2.0E-02	12.2	6.5E-02 OK
K-TurbKE	0.99	1.9E-03	5.6E-02	5.3	7.5E-02 OK
E-Diss.K	0.76	1.6E-03	1.5E-01	18.7	7.3E-04 OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 40 CPU SECONDS = 2.226E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.87	7.5E-04	5.8E-02	3.3E-02	OK
V-Mom	0.94	1.1E-03	6.1E-02	2.7E-02	OK
W-Mom	1.03	5.1E-04	1.9E-02	4.5E-02	OK
P-Mass	0.88	1.2E-04	1.4E-02	12.2	7.7E-02 OK
K-TurbKE	1.04	2.0E-03	7.5E-02	5.3	7.4E-02 OK
E-Diss.K	0.86	1.4E-03	8.5E-02	18.7	7.7E-04 OK

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01

W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 41 CPU SECONDS = 2.278E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.86	6.5E-04	4.1E-02	2.5E-02	OK
V-Mom	0.95	1.0E-03	6.7E-02	2.4E-02	OK
W-Mom	0.93	4.7E-04	2.1E-02	3.4E-02	OK
P-Mass	0.81	9.5E-05	1.0E-02	12.2 7.5E-02	OK
K-TurbKE	1.01	2.0E-03	7.4E-02	5.3 7.4E-02	OK
E-Diss.K	0.94	1.3E-03	6.6E-02	18.7 7.8E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 42 CPU SECONDS = 2.330E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.87	5.6E-04	4.6E-02	2.2E-02	OK
V-Mom	1.00	1.0E-03	7.3E-02	2.0E-02	OK
W-Mom	0.89	4.2E-04	1.9E-02	2.9E-02	OK
P-Mass	0.85	8.0E-05	7.9E-03	12.2 5.6E-02	OK
K-TurbKE	0.92	1.8E-03	6.5E-02	5.3 7.6E-02	OK
E-Diss.K	0.96	1.2E-03	7.1E-02	18.7 7.4E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 43 CPU SECONDS = 2.381E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.02	5.7E-04	4.8E-02	2.0E-02	OK
V-Mom	1.02	1.0E-03	7.7E-02	1.8E-02	OK
W-Mom	0.98	4.1E-04	2.4E-02	2.7E-02	OK
P-Mass	0.94	7.6E-05	7.7E-03	12.2 4.1E-02	OK
K-TurbKE	0.85	1.6E-03	4.8E-02	5.4 7.6E-02	OK
E-Diss.K	0.97	1.2E-03	5.5E-02	18.7 6.5E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 44 CPU SECONDS = 2.433E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	1.04	6.0E-04	4.5E-02	2.0E-02	OK
V-Mom	0.92	9.5E-04	6.0E-02	1.6E-02	OK
W-Mom	1.01	4.2E-04	3.0E-02	2.7E-02	OK
P-Mass	0.95	7.2E-05	7.3E-03	12.2 3.6E-02	OK
K-TurbKE	0.88	1.4E-03	5.0E-02	5.3 7.6E-02	OK
E-Diss.K	0.96	1.1E-03	6.8E-02	18.7 5.5E-04	OK

=====

OUTER LOOP ITERATION = 45 CPU SECONDS = 2.485E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.90	5.4E-04	3.4E-02	5.3E-02	OK
V-Mom	0.84	8.0E-04	6.2E-02	4.7E-02	OK
W-Mom	0.95	4.0E-04	3.4E-02	6.7E-02	OK
P-Mass	0.84	6.0E-05	5.2E-03	8.5 9.3E-02	OK
K-TurbKE	0.97	1.3E-03	5.2E-02	5.4 7.2E-02	OK
E-Diss.K	0.89	1.0E-03	6.9E-02	18.7 5.5E-04	OK

=====

Timescale Information

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.35521E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.35521E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.35521E+01

=====

OUTER LOOP ITERATION = 46 CPU SECONDS = 2.536E+03

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom	0.84	4.5E-04	4.2E-02	5.3E-02	OK
V-Mom	0.97	7.7E-04	5.4E-02	4.5E-02	OK
W-Mom	0.95	3.8E-04	4.0E-02	6.8E-02	OK
P-Mass	0.85	5.1E-05	4.7E-03	8.5 9.5E-02	OK
K-TurbKE	1.00	1.3E-03	5.4E-02	5.4 6.4E-02	OK
E-Diss.K	0.92	9.4E-04	7.2E-02	18.7 6.3E-04	OK

CFD Solver finished: Fri May 17 18:09:39 2013
 CFD Solver wall clock seconds: 2.5750E+03

=====

Termination and Interrupt Condition Summary

=====

CFD Solver: Run duration reached
 (Maximum number of outer iterations)

=====

Boundary Flow and Total Source Term Summary

=====

U-Mom		
Boundary	: Default Domain Default	-9.3770E+00
Boundary	: INLET	1.5990E-04
Boundary	: OUTLET	-3.7754E+00
Boundary	: PISO DOM	-1.1459E+00

Boundary	: TETOS	1.0406E+00
Boundary	: VERTICAIS	1.6068E+01
Domain Imbalance :		2.8108E+00
Domain Imbalance, in %:		0.0137 %

```

+-----+
|                                     V-Mom                                     |
+-----+
Boundary      : Default Domain Default      -2.0616E+02
Boundary      : INLET                       2.0468E+04
Boundary      : OUTLET                      -2.0043E+04
Boundary      : PISO DOM                    -9.0768E+01
Boundary      : TETOS                       -1.5584E+00
Boundary      : VERTICAIS                   -1.3695E+02
+-----+
Domain Imbalance : -1.0118E+01
Domain Imbalance, in %: -0.0494 %

```

```

+-----+
|                                     W-Mom                                     |
+-----+
Boundary      : Default Domain Default      -2.3475E+02
Boundary      : INLET                       -7.8092E-05
Boundary      : OUTLET                       3.2687E+00
Boundary      : PISO DOM                     2.4228E+02
Boundary      : TETOS                       -1.0546E+01
Boundary      : VERTICAIS                   -2.7781E-01
+-----+
Domain Imbalance : -2.5434E-02
Domain Imbalance, in %: -0.0001 %

```

```

+-----+
|                                     P-Mass                                     |
+-----+
Boundary      : INLET                       1.0002E+04
Boundary      : OUTLET                      -1.0002E+04
+-----+
Domain Imbalance : 1.0742E-02
Domain Imbalance, in %: 0.0001 %

```

```

=====
wall Force and Moment Summary
=====

```

Notes:
1. Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```

+-----+
|                                     Pressure Force On Walls                                     |
+-----+
|                                     X-Comp.      Y-Comp.      Z-Comp.      |
+-----+
Domain Group: Default Domain
Default Domain Default      9.4092E+00  -1.0288E-04  2.3471E+02
PISO DOM                    1.6727E-06  2.8046E-07  -2.4228E+02

```

TETOS	-9.9895E-01	1.5848E+00	1.0495E+01
VERTICAIS	-1.5959E+01	1.3698E+02	3.9894E-02
Domain Group Totals :	-7.5484E+00	1.3856E+02	2.9727E+00

Viscous Force On walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.

Domain Group: Default Domain

Default Domain Default	-3.2325E-02	2.0616E+02	3.2766E-02
PISO DOM	1.1459E+00	9.0768E+01	-1.9125E-09
TETOS	-4.1649E-02	-2.6394E-02	5.0604E-02
VERTICAIS	-1.0969E-01	-3.3792E-02	2.3792E-01
Domain Group Totals :	9.6221E-01	2.9686E+02	3.2129E-01

Pressure Moment On walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.

Domain Group: Default Domain

Default Domain Default	7.1253E+03	-1.0110E+04	9.7564E+02
PISO DOM	-5.1991E+03	1.0789E+04	-5.7402E-05
TETOS	4.4166E+02	-4.8246E+02	1.1730E+02
VERTICAIS	-3.7502E+02	-5.9243E+01	7.2536E+03
Domain Group Totals :	1.9928E+03	1.3725E+02	8.3465E+03

Viscous Moment On walls			
	X-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.

Domain Group: Default Domain

Default Domain Default	-7.3220E+03	-4.6468E+00	8.9754E+03
PISO DOM	3.1517E-05	-3.4438E-07	3.7974E+03
TETOS	1.7111E+00	-1.8054E+00	5.8867E-01
VERTICAIS	1.0505E+01	-1.2208E+01	3.2461E+00
Domain Group Totals :	-7.3098E+03	-1.8661E+01	1.2777E+04

Locations of Maximum Residuals				
Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	7293	5.237E+01	4.200E+01	8.150E+00
V-Mom	668735	5.683E+01	5.033E+01	3.950E-01
W-Mom	23165	5.240E+01	4.187E+01	8.150E+00
P-Mass	5095	4.915E+01	4.090E+01	3.679E+00
K-TurbKE	712080	5.683E+01	5.660E+01	2.105E+00
E-Diss.K	5012	5.148E+01	4.082E+01	8.150E+00

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	3	2.46627E-03	4.49317E-04
V-Mom	3	3.24209E-02	7.73111E-04
W-Mom	3	2.13545E-03	3.76834E-04
P-Mass	1	1.55728E-02	5.10299E-05
K-TurbKE	1	1.65480E-01	1.32095E-03
E-Diss.K	1	1.35640E-01	9.36380E-04

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	6.23395E+02
V-Mom	Auto	6.23395E+02
W-Mom	Auto	6.23395E+02
K-TurbKE	Auto	6.23395E+02
E-Diss.K	Auto	6.23395E+02

Average Scale Information

Domain Name : Default Domain

Global Length	= 9.0347E+01
Minimum Extent	= 4.8900E+01
Maximum Extent	= 1.7476E+02
Density	= 1.1850E+00
Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Velocity	= 1.4084E+00
Advection Time	= 6.4149E+01
Reynolds Number	= 8.2351E+06

Variable Range Information

Domain Name : Default Domain

Variable Name	min	max
Density	1.18E+00	1.18E+00
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
Thermal Conductivity	2.61E-02	2.61E-02
Static Entropy	0.00E+00	0.00E+00
Velocity u	-2.03E+00	1.92E+00
Velocity v	-1.44E+00	2.47E+00
Velocity w	-6.61E-01	2.18E+00
Pressure	-3.36E+00	2.43E+00
Turbulence Kinetic Energy	3.22E-08	4.97E-01
Turbulence Eddy Dissipation	6.17E-08	1.07E+00
Eddy Viscosity	8.48E-11	2.80E-01
Temperature	2.98E+02	2.98E+02

```

+-----+
| CPU Requirements of Numerical Solution |
+-----+

```

Subsystem Name	Discretization (secs. %total)		Linear Solution (secs. %total)	
Momentum and Mass	1.30E+03	49.9 %	3.12E+02	12.0 %
TurbKE and Diss.K	3.77E+02	14.5 %	3.38E+02	13.0 %
Subsystem Summary	1.67E+03	64.4 %	6.51E+02	25.1 %
Variable Updates	2.38E+02	9.2 %		
File Reading	4.06E-01	0.0 %		
File Writing	8.47E+00	0.3 %		
Miscellaneous	2.60E+01	1.0 %		
Total	2.60E+03			

```

+-----+
| Job Information |
+-----+

```

```

Host computer: PEDRO-PC
Job finished: Fri May 17 18:09:50 2013
Total CPU time: 2.596E+03 seconds
                or: ( 0: 0: 43: 16.278 )
                   ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

Total wall clock time: 2.612E+03 seconds
                or: ( 0: 0: 43: 32.000 )
                   ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

```

End of solution stage.

```

+-----+
| The results from this run of the ANSYS CFX Solver have been |
| written to C:\Users\Administrador\Downloads\Uni_90\2ms |
| c\Unnamed_pre_004.res |
+-----+

```

This run of the ANSYS CFX solver has finished.

ANEXO

Fórmula do Coeficiente de Pressão inserida no software CFX Post®

Segundo Abbott e Von Doenhoff (1959)*, o coeficiente de pressão (C_p) é um parâmetro muito útil para estudar o fluxo de fluidos incompressíveis como a água, e também em fluidos com fluxos de baixas velocidades como o ar. A relação entre esse coeficiente, adimensional, e os números dimensionais é:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2}$$

Onde:

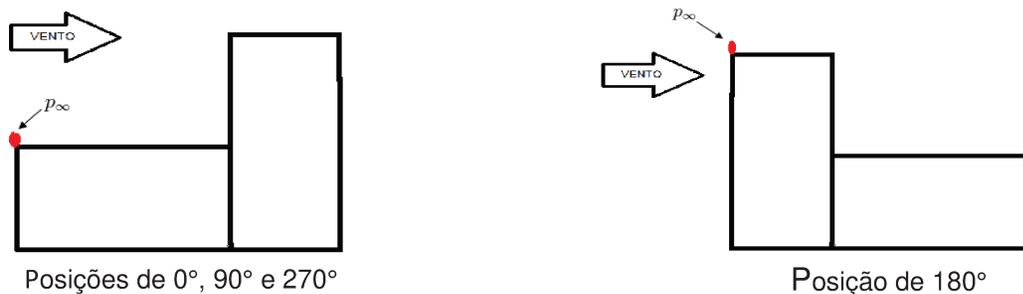
p é a pressão estática do fluido no ponto em que o coeficiente de pressão é avaliado (Pa).

p_∞ ou PR (pressão de referência) é a pressão do fluxo livre, ou seja, que se encontra fora de qualquer perturbação criada pelo corpo estranho (Pa).

ρ_∞ é a densidade do fluido no fluxo (a do ar ao nível do mar e 15 °C é 1.225 Kg/m³)

V_∞ é a velocidade de fluxo livre do fluido, ou a velocidade do corpo através do fluido (m/s).

Para as quatro torres analisadas, p é o ponto de pressão localizado no centro geométrico das aberturas superiores das torres e p_∞ (ou PR) é o ponto de pressão do fluxo livre, o qual depende da posição da torre em relação ao vento, conforme mostram as figuras abaixo:



* ABBOTT, I.H; VON DOENHOFF, A.E. Theory of wing sections, including a summary of airfoil data. New York: Dover Publications, 1959.

