UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Bacharelado em Engenharia Civil

Caroline Mendes Torres

Lázaro Pereira dos Santos

SIMULAÇÃO DE VENTO ELETRÔNICO EM EDIFÍCIOS ALTOS COM QUINAS VIVAS E QUINAS CHANFRADAS

Teófilo Otoni

2018

Caroline Mendes Torres

Lázaro Pereira dos Santos

SIMULAÇÃO DE VENTO ELETRÔNICO EM EDIFÍCIOS ALTOS COM QUINAS VIVAS E QUINAS CHANFRADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Msc. Eduardo Lourenço Pinto

Teófilo Otoni

2018

Caroline Mendes Torres

Lázaro Pereira dos Santos

SIMULAÇÃO DE VENTO ELETRÔNICO EM EDIFÍCIOS ALTOS COM QUINAS VIVAS E QUINAS CHANFRADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Msc. Eduardo Lourenço Pinto

Data de aprovação 17/08/2018

Prof. Msc. Danilo Bento Oliveira

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

Prof. Msc. Flávio Alchaar Barbosa

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

Prof. Msc. Eduardo Lourenço Pinto

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia – UFVJM

Teófilo Otoni

RESUMO

Com o crescimento populacional nas grandes cidades surgiu à necessidade de uma expansão vertical das edificações devido à limitação espacial. O desenvolvimento tecnológico permitiu a criação de materiais construtivos de melhor qualidade que dentro da Engenharia Civil proporcionou a criação de edifícios cada vez mais altos. Tem-se como representantes desses materiais o concreto armado e o aço estrutural que garantem às peças estruturais alta resistência, redução do peso próprio e a possibilidade de peças mais esbeltas. Porém, uma edificação de grande porte está sujeita a carregamentos demasiados elevados e que implicam no seu dimensionamento estrutural. Para o presente trabalho, será abordado o efeito dinâmico do vento em edifícios altos com o uso do *software ANSYS* como ferramenta computacional para simular os efeitos em modelos geométricos idealizados dentro do próprio *software*. Será realizado um estudo numérico através da fluidodinâmica computacional (*CFD*) que pode ser dividida em cinco etapas dentro do *software*, concepção da geometria; criação da malha, refino e parâmetros da camada limite; configuração das condições de contorno; solução; e analise dos resultados. Com os resultados obtidos foi possível comparar a interferência gerada pela ação dos ventos em edifícios altos de planta retangular com quinas vivas e com quinas chanfradas, propondo um modelo construtivo para edificações de tal forma que as ações dos ventos sejam menos agressivas a estrutura.

Palavras chave: Desenvolvimento Tecnológico. Análise dinâmica. Estudo Numérico. *Software*. *ANSYS*.

.

ABSTRACT

With population growth in large cities there was a need for vertical expansion of buildings due to spatial limitations. The technological development allowed the creation of better quality building materials that within Civil Engineering provided the creation of ever higher buildings. It has as representatives of these materials the reinforced concrete and structural steel, which guarantee to structural parts high resistance, weight reduction and the possibility of slimmer parts. However, a large building is subject to too high loads and imply in its structural design. For the present work, will be addressed the dynamic effect of wind in high buildings with the use of ANSYS software as a computational tool to simulate the effects on geometric models idealized within the own software. A numerical study will be carried out through computational fluid dynamics (CFD), which can be divided into five steps within the software, geometry design; mesh creation, refining and boundary layer parameters; setting the boundary conditions; solution and analysis of results. With the obtained results it was possible to compare the interference generated by the action of the winds in tall buildings of rectangular plant with living corners and bevelled corners, proposing a constructive model for buildings in such a way that the actions of the winds are less aggressive the structure.

Keywords: Technological Development. Dynamic analysis. Numerical Study. Software. ANSYS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da Camada Limite Próxima a Superfície de um Sólido 21
Figura 2 – Isopletas da Velocidade Básica V_0 (m/s) 22
Figura 3 – Fator Topográfico S_1 23
Figura 4 – Exemplo de Distribuição de Pressão em Edifício 25
Figura 5 – Exemplo de Escoamento do Vento 26
Figura 6 – Semelhanças Físicas em Modelos Reduzidos Segundo Blessmann 27
Figura 7 – Parâmetros a,b e h para os Modelos Numéricos 32
Figura 8 – Geometrias dos Modelos 1 e 2 34
Figura 9 – Recomendação do *ANSYS* para Dimensões dos Domínios de Análise 35
Figura 10 – Modelo 1 e 2 em Seus Volumes de Controle 35
Figura 11 – A Malha do Volume de Controle 36
Figura 12 – Detalhe do Refino da Malha dos Modelos 1 e 2 37
Figura 13 – Detalhes da Camada Limite 39
Figura 14 – Resultados do Processamento *Fluid Flow (CFX) Solution* 40
Figura 15 – Distribuições e coeficientes de pressão do modelo de calibração frente à NBR 6123 (1988) 42
Figura 16 – Contorno de Pressões para o Modelo 1 44
Figura 17 – Contorno de Pressões para o Modelo 2 45
Figura 18 – Contorno de Pressões para o Modelo 1 46
Figura 19 – Contorno de Pressões para o Modelo 2 47
Figura 20 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 1 48
Figura 21 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 2 49
Figura 22 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 1 50
Figura 23 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 2 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Caracterização dos Modelos.....31
Tabela 2 – Dimensões das Edificações.....31
Tabela 3 – Parâmetros para Cálculo da Camada Limite para os Modelos Reduzidos.....38
Tabela 4 – Condições de Contorno 39
Tabela 5 – Pressões Máximas e Mínimas para Vento 0º.....43
Tabela 6 – Pressões Máximas e Mínimas para Vento 90º.....45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **16**
1.1 Considerações Iniciais **16**
1.2 Justificativa **17**
1.3 Objetivos **17**
1.3.1 Objetivos Gerais *17*
1.3.2 Objetivos Específicos *18*

2 REFERENCIAL TEÓRICO **20**
2.1 Conceitos Importantes **20**
2.1.1 Vento *20*
2.1.2 Camada Limite *20*
2.1.3 Velocidade Básica do Vento *22*
2.1.4 Pressão Efetiva e Pressão Dinâmica do Vento *24*
2.1.5 Distribuições de Pressões de Edifícios *25*
2.1.6 Modelos Reduzidos *26*
2.2 Métodos Numéricos **27**

3 METODOLOGIA **30**

4 ANÁLISE NUMÉRICA **34**
4.1 Geometria **34**
4.2 Malha **36**
4.3 Condições de Contorno **39**
4.4 Solução **40**

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **42**
5.1 *Fluid Flow (CFX)* **42**

5.1.1 Contour - Pressões.....*42*

5.1.2 Streamlines - Velocidades.....*47*

6 CONCLUSÃO.....**52**

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....**54**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....**56**

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Apesar de ser a solução mais viável para aproveitamento de espaço em grandes centros, a construção de edifícios de múltiplos andares precisa de uma atenção especial no que diz respeito à atuação de cargas na edificação. Suas estruturas e elementos estruturais devem apresentar características adequadas para permitir uma longa vida útil à estrutura e que garanta a segurança dos usuários.

Ao se realizar o projeto estrutural de uma edificação, deve-se ter conhecimento de todas as forças que a estrutura estará submetida para que seja realizado um dimensionamento satisfatório. Essas forças podem ser permanentes ou variáveis. As forças permanentes são aquelas que se mantêm constantes durante toda a vida útil da estrutura como o peso próprio e instalações permanentes. Ações variáveis são aquelas que variam no decorrer do tempo, são elas ações da chuva, do vento, da temperatura e cargas móveis como pessoas e mobília (NBR 6123, 1988).

Neste trabalho, o foco será em analisar a ação variável ocasionada pelos ventos. De um modo geral, todas as edificações estão sujeitas a sofrer a ação dinâmica do vento, mas a forma que essas serão afetadas depende de vários fatores como o tipo de construção, a forma da edificação, disposição dos elementos construídos, tamanho das aberturas de portas, janelas e varandas, quantidade de pavimentos, etc.

A preocupação de pesquisadores em estudar o efeito que o vento causa em edificações vem desde o século XIX, quando foram registrados os primeiros ensaios experimentais em modelos ilustrativos. O primeiro ensaio realizado em um túnel de vento, onde foi estudado o comportamento de modelos geométricos primitivos, foi realizado por Kernt em 1893. Já em 1964, Blessmann estudou a ação de vento em edifícios em um túnel de vento aerodinâmico usando modelos com características da arquitetura brasileira apresentando, então, resultados experimentais consideráveis.

Para que o engenheiro consiga desenvolver uma edificação dotada de mecanismos para suportar esses efeitos, a NBR 6123:1988, Forças Devidas ao Vento em Edificações, apresenta as recomendações técnicas necessárias para tal. Essa norma regulamentadora permite que se usem métodos simplificadores e que se classifiquem as ações do vento como estáticas, ao invés de dinâmicas. Para isso, algumas recomendações presentes na norma devem ser seguidas.

Uma das formas mais comuns de ações de ventos na estrutura é o arrancamento da cobertura da edificação, podendo ser total ou parcial, de toda estrutura ou apenas das telhas ou até o arrancamento de portas e janelas. Devido a esses incidentes, faz-se necessário que engenheiros não desprezem as ações dos ventos na hora de elaborar os projetos.

O avanço da engenharia traz de forma cada vez mais rápida materiais mais resistentes tornando possível que as construções esbanjem cada vez mais leveza, flexibilidade e esbeltez. O número de profissionais capacitados cada vez maior, aliado ao avanço dos estudos e da tecnologia tornou comum que seja encontrado edificações cada vez mais altas e com arranjos físicos cada vez mais ousados, consequentemente a isso, temos edificações cada vez mais esbeltas e com menor rigidez estrutural e por isso a análise das ações dos ventos se torna imprescindível para avaliar e combater a presença de possíveis oscilações e vibrações na estrutura (BELLEI ET AL, 2008).

O desenvolvimento de programas como o *ANSYS, Inc*, ferramenta computacional utilizada no presente trabalho, facilitou estudos precisos da análise de ventos em projetos estruturais permitindo que os edifícios se tornem cada vez mais altos e também mais esbeltos.

1.2 Justificativa

Em edificações de grande porte como galpões e edifícios altos, o dimensionamento estrutural baseado nas cargas permanentes não é suficiente, sendo importante também se considerar as cargas variáveis como a ação do vento.

A Norma Regulamentadora Brasileira, NBR 6123 (1988), responsável pelo cálculo dos carregamentos gerados em edificações sob ação do vento, prevê que os efeitos dinâmicos do vento sejam considerados estáticos, levando em conta alguns coeficientes como o de pressão e o de arrasto. Em mãos desses coeficientes, é possível calcular as cargas atuantes na estrutura que somadas às cargas permanentes, permitirão um correto dimensionamento estrutural.

Sabe-se que a análise dinâmica mediante ensaios de túnel de vento seriam ideais e mais próximos da realidade, porém, a simulação eletrônica garante bons resultados em comparação a NBR 6223 (1988), permitindo sua utilização como um bom modelo de cálculo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise dinâmica dos efeitos do vento, a partir do *software ANSYS*, em edificações com múltiplos andares com quinas vivas e em edifícios de múltiplos andares com quinas chanfradas. A partir dos dados

numéricos encontrados, verificar-se-á distribuições de pressões e de velocidades dos modelos de edificações analisados.

1.3.2 Objetivos Específicos

Neste trabalho busca-se:

- Caracterizar as regiões de turbulência, vorticidade e formação de esteiras;
- Avaliar os contornos de pressões que são gerados a partir das ações do vento;
- Realizar uma comparação entre os resultados dos modelos sob ação do vento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceitos Importantes

Alguns conceitos importantes sobre a ação do vento e sobre o funcionamento do *software* utilizado nas análises dos resultados serão abordados a seguir para melhor entendimento do desenvolvimento do trabalho.

2.1.1 Vento

O vento pode ser compreendido como o movimento horizontal do ar devido à diferença de pressões existentes na atmosfera. Pode-se dizer que o vento ocorre devido ao fato da temperatura ser diferente em cada ponto na Terra, e, essa variação ocorre devido à incidência dos raios solares e as propriedades térmicas dos solos e oceanos (TARANATH, 1988).

O vento normalmente apresenta comportamento turbulento, com diversos redemoinhos. Isso faz com que o vento mude bruscamente de velocidade ao percorrer seu caminho, essas variações bruscas podem ser chamadas de rajadas e são elas que oferecem perigo para as estruturas e por isso devem ser estudadas mais cuidadosamente (GONÇALVES, 2007).

A compreensão matemática exata para a interação entre fluidos e sólidos, estando um ou ambos em movimento, é de uma ordem de complexidade muito grande. Um modo de facilitar a compreensão desta interação é por se considerar casos limites, que quando usados, não acarretam em alterações consideráveis nos resultados (BLESSMANN, 2011).

2.1.2 Camada Limite

Para fluidos de pequena viscosidade, tais como a água e o ar, as forças viscosas geradas durante o escoamento de fluido sobre um sólido são importantes apenas em uma fina camada nas proximidades da superfície do corpo sólido, essa camada é denominada camada limite. Fora dessa camada, os efeitos de viscosidade são muito pequenos, dessa forma podendo ser desprezados e o fluido passa a ser tratado como um fluido ideal. (BLESSMANN, 2011).

No escoamento de um fluido são observáveis três diferentes zonas na camada limite. A primeira é a zona laminar onde as linhas de corrente se aderem à superfície do corpo sólido e fluem levemente acompanhando a geometria do corpo. A segunda é a zona de transição onde a camada limite sofre um leve aumento em sua espessura, o fluxo não é laminar e a velocidade varia com o tempo até se transformar em turbulência por completo.

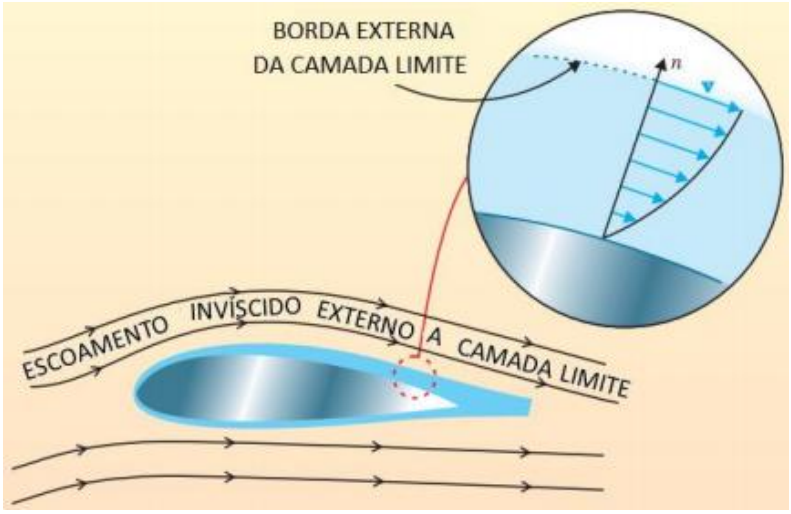
Por fim, a zona turbulenta, onde a turbulência está completamente instalada, a espessura da camada limite aumenta ainda mais, formam-se redemoinhos e o fluxo é caótico. (GRALA, 2013).

De acordo com trabalho de Fox *et al* (2010), o número de *Reynolds* é importante na caracterização do escoamento já que é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas, ambas com significado na camada limite.

Já a camada limite atmosférica pode ser definida, segundo Blessmann (2011), como a região da toposfera onde a velocidade do vento sofre influência de vários fatores como a topografia do terreno, dimensões, existência de obstáculos, além da variação da temperatura.

Segundo Fornel (2016), o perfil de velocidade do vento nas proximidades da superfície terrestre, varia de zero, na própria superfície, ao seu valor máximo chamado de velocidade gradiente. A altura em que a velocidade do vento atingir a velocidade gradiente é chamada de altura gradiente. Isso pode ser explicado principalmente pelo atrito causado pelas rugosidades existentes, naturais ou artificiais, na superfície terrestre. Quanto maior for a rugosidade na superfície terrestre, maior será agitação das partículas no ar e consequentemente maior será a altura da camada limite atmosférica. Como exemplo, Blessmann (2011) citou que a altura gradiente é maior nos grandes centros se comparado com campos abertos, isso devido existir maiores obstáculos nas cidades. Na Figura 1 observe a formação da camada limite no escoamento fluido-sólido, e a relação entre velocidade gradiente com a espessura da camada limite.

Figura 1 – Representação da Camada Limite Próxima a Superfície de um Sólido



Fonte: FORNEL, 2016.

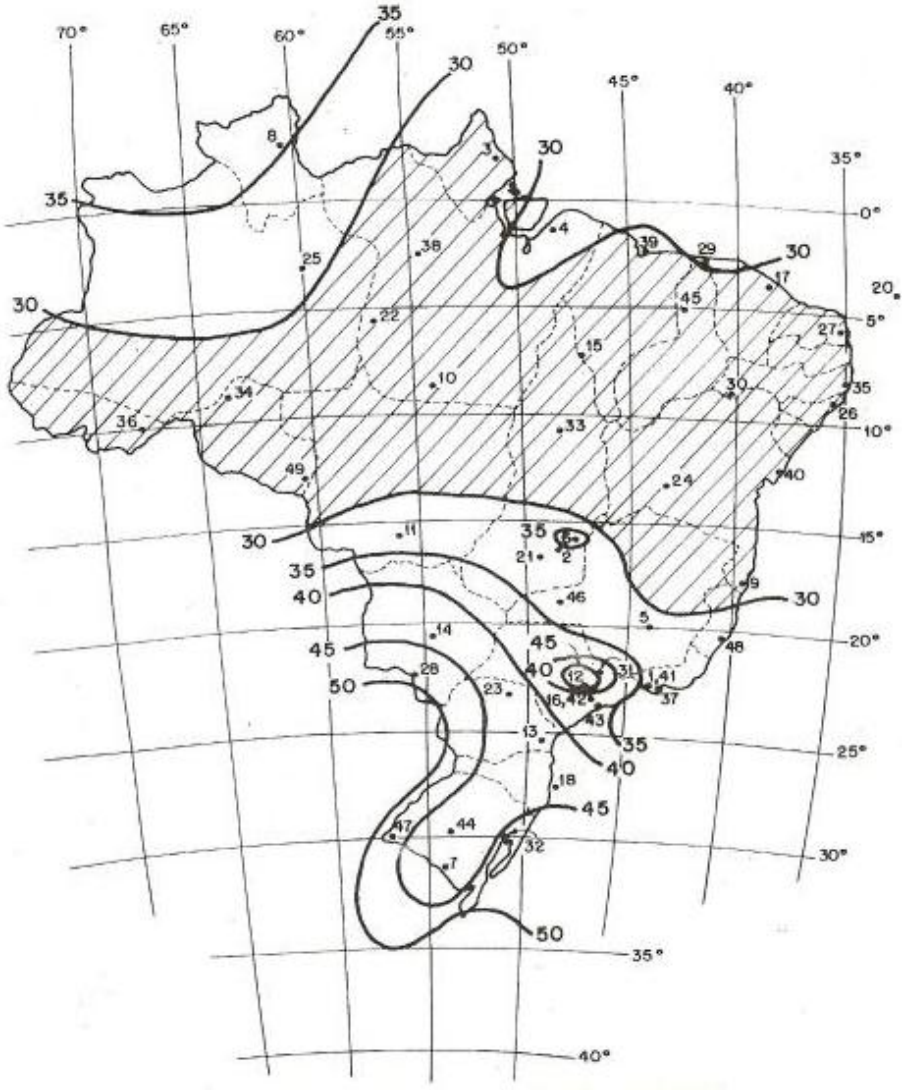
2.1.3 Velocidade Básica do Vento

Segundo a norma regulamentadora NBR 6123 (1988), a velocidade básica do vento (V_o) é a velocidade que uma rajada de três segundos apresenta, podendo exceder em média uma vez a cada cinquenta anos, analisando a dez metros de altura do terreno, em um campo aberto sem rugosidades. Com base nesses dados foi elaborado o mapa de isopletas conforme a Figura 2 que descreve as velocidades básicas em cada região do Brasil. Para situações diferentes é preciso corrigir o valor da velocidade e para isso são utilizados os fatores de correção S_1, S_2 e S_3 a partir da equação abaixo.

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (1)$$

Onde V_k e V_0 são expressos em m/s.

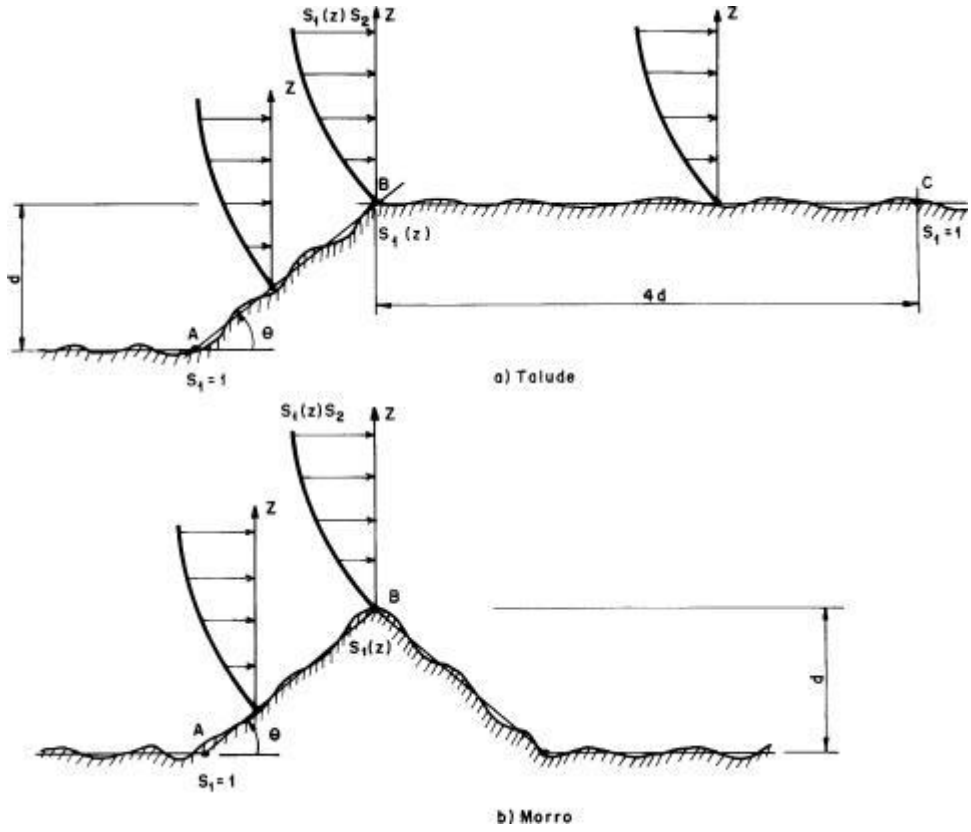
Figura 2 – Isopletas da Velocidade Básica V_0 (m/s)



Fonte: NBR 6123 (1988).

O fator S_1 corresponde ao fator topográfico e nele são consideradas as variações existentes no relevo. Para terrenos planos ou fracamente acidentados, o fator de correção S_1 tem valor igual a 1,0. A Figura 3 representa como é determinado o fator S1 para taludes e morros alongados onde pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional. Sendo assim, ele determinado em função da inclinação média do talude ou da inclinação da encosta do morro *θ*, da altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado *z* e da diferença de nível entre a base e o topo do talude *d* (NBR 6123, 1988).

Figura 3 – Fator Topográfico S_1



Fonte: NBR 6123 (1988).

O fator S_2 corresponde ao fator de rugosidade do terreno e das dimensões da edificação sobre o terreno. Para sua determinação são considerados os efeitos da rugosidade do terreno (presença ou não de obstáculos) e das dimensões da edificação (obstrução do fluxo).

O fator S_3 corresponde ao fator estatístico que considera o quão seguro a edificação deve ser, além do seu tempo de vida útil. De acordo com a NBR 6123 (1988), a probabilidade de um vento exceder a velocidade básica V_0 no período de recorrência de cinquenta anos é de 63%, isso para edificações normais. Para outros tipos de edificações a velocidade deve ser corrigida e a norma apresenta valores tabelados mínimos.

Os valores dos três fatores, S1, S2 e S3, são encontrados detalhadamente na NBR 6123 (1988).

2.1.4 Pressão Efetiva e Pressão Dinâmica do Vento

A presença de um corpo em um campo de escoamento de um fluido provoca perturbações que implicam na variação de pressão de um ponto a outro, dessa maneira, a pressão efetiva corresponde à variação de pressão em relação à pressão atmosférica.

Analisando-se dois pontos em campo de escoamento, sendo o ponto 1, o ponto de referência sem perturbações, e o ponto 2 o ponto perturbado pela presença de um corpo, partindo da equação de *Bernoulli*, considerando o ar como um fluido incompressível e com carga piezométrica desprezível, tem-se que a pressão total do sistema ao longo de uma das linhas de fluxo é conservada de acordo com a equação (2).

$$½\,\rho u_1^2 + p_1 = ½\,\rho u_2^2 + p_2 = \text{constante} \tag{2}$$

Onde:

ρ é a massa específica (kg/m³);

u é a velocidade do fluido (m/s);

p é a pressão estática (Pa).

Reorganizando a equação (2) temos:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = ½\,\rho(u_1^2 - u_2^2) = p_e \tag{3}$$

Em que p_e representa a pressão efetiva no ponto de análise.

Nos pontos onde uma ou mais linhas de fluxo são perpendiculares à face do corpo, assume-se que toda pressão efetiva é transformada em pressão estática, dessa forma, a velocidade nesse ponto é considerada nula. Tais pontos são chamados de pontos de obstrução.

Partindo da equação (2) e tomando p_1e u_1, a pressão atmosférica e a velocidade do fluido no sentido que o vento sopra e p_2e u_2, a pressão e a velocidade no ponto de obstrução, temos:

$$½\rho u_1^2 + p_1 = p_2 \tag{4}$$

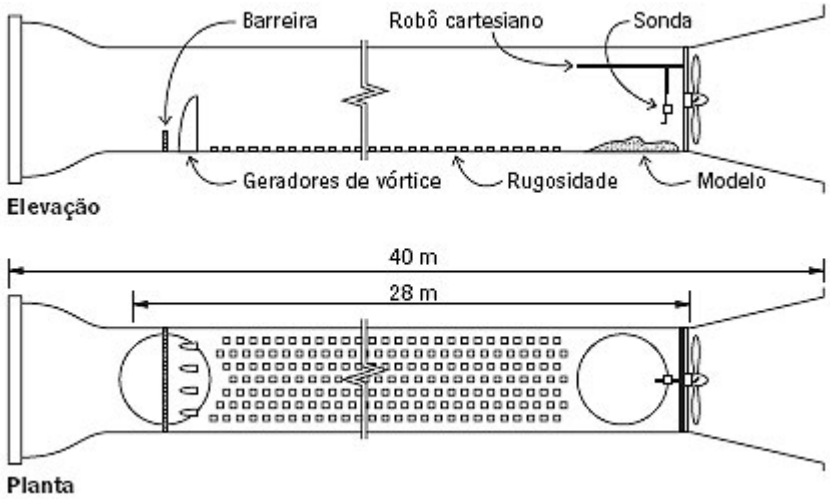
$$\Delta p = ½\,\rho u_1^2 = q \tag{5}$$

Em que q representa a pressão dinâmica (ou pressão de obstrução) no ponto.

2.1.5 Distribuição de Pressões em Edifícios

Para Blessmann (2011), a distribuição das pressões devido à ação do vento em edifícios depende de alguns fatores como: a forma da edificação, os elementos arquitetônicos, os vértices, etc. Após feito a análise de vento, pode ser necessário o reposicionamento dos elementos do projeto, sejam eles estruturais ou não, gerando além de segurança, economia para a edificação. Ao realizar o projeto estrutural de uma edificação com múltiplos andares é imprescindível que as pressões causadas pelo vento sejam consideradas. Além de possíveis sobrepressões, as sucções externas também podem causar o arrancamento de elementos da edificação. A Figura 4 representa o esquema de um dos túneis de vento utilizado nos trabalhos de Blessman para obtenção dos valores de coeficiente de pressão.

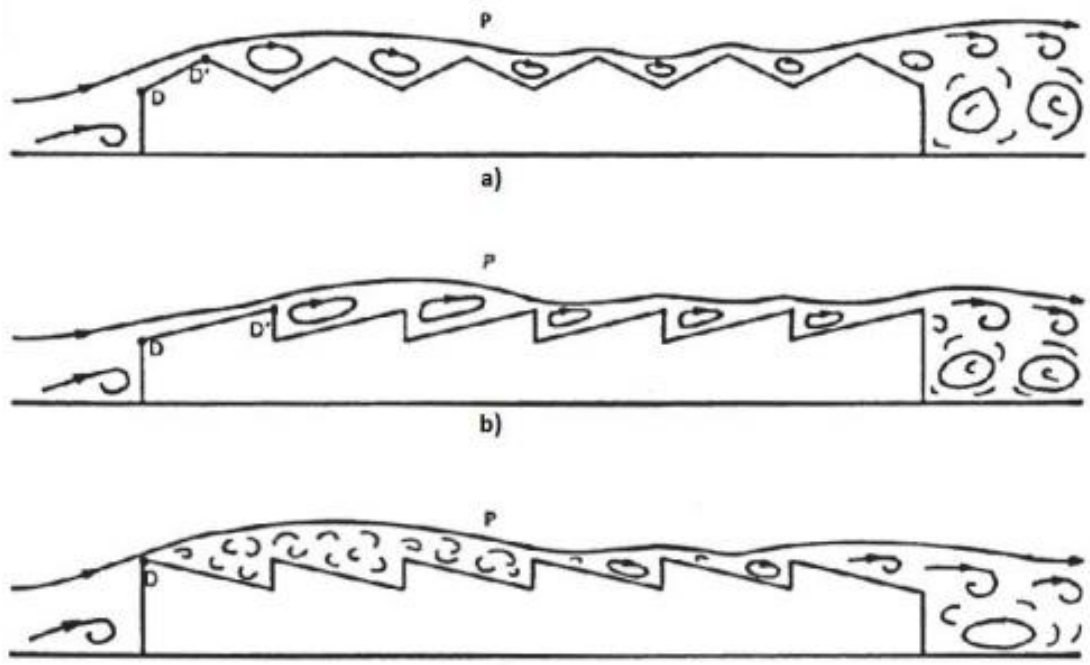
Figura 4 – Exemplo de Distribuição de Pressão em Edifício



Fonte: Téchne. Edição 156 - Março/2010

A região onde o vento incide nas edificações é chamada de barlavento, nessa região como mencionado no item 2.1.4 a velocidade assume valor igual à zero já que se trata de pontos de obstrução. Nessa região são obtidos os valores máximos de pressão (sobrepressão). Na região de saída do vento, chamada de sotavento, e em locais de arestas e vértices das edificações é possível observar o surgimento de vórtices nas linhas de fluxo, caracterizados pela formação de redemoinhos. Nessas regiões são obtidos os valores mínimos de pressão (sucção). É possível observar esses efeitos na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de Escoamento do Vento



Fonte: BLESSMANN, 2009.

2.1.6 Modelos Reduzidos

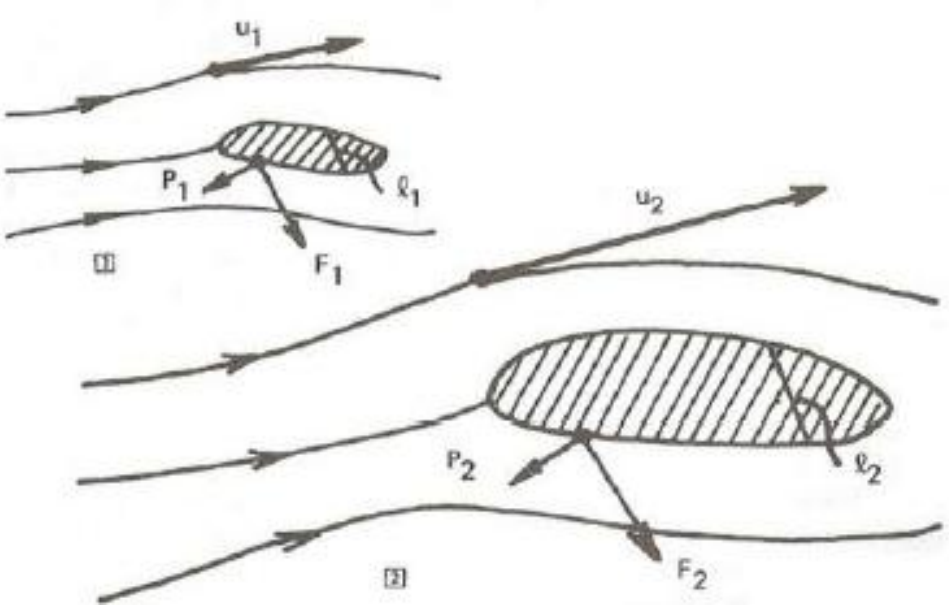
A análise dimensional realizada em modelos reduzidos pode ser vantajosa pela obtenção mais rápida de resultados, a economia, a viabilidade da construção, entre outras. Mas para que seja válida a sua utilização é preciso atentar a algumas condições que devem ser satisfeitas sobre modelos (GALTER, 2015).

Blessmann (2011) determina algumas semelhanças que os modelos reduzidos sob ações do vento devem obedecer:

(a) Semelhança Geométrica: devem apresentar formas semelhantes e dispostas com a mesma orientação em relação às condições de contorno, a relação matemática entre os comprimentos também deve ser constante.
(b) Semelhança Cinemática: a distribuição das velocidades médias e as características da turbulência devem análogas tanto no modelo como no caso real, e a relação entre os módulos das velocidades nos dois escoamentos devem ser constantes.
(c) Semelhança Dinâmica: pode ser definida como a semelhança geométrica entre as forças se os valores absolutos das forças guardam a mesma proporção constante em pontos equivalentes dos dois sistemas.

Na Figura 6 representa o esquema de um modelo reduzido perante o seu modelo real. Observe que as relações geométricas são respeitadas, bem como os pontos de atuação das grandezas e as suas intensidades, todos em conformidade com o fator de redução.

Figura 6 – Semelhanças Físicas em Modelos Reduzidos Segundo Blessmann



Fonte: BLESSMANN, 2011.

2.2 Métodos Numéricos

O escoamento de fluidos é descrito pelas equações da conservação da massa, energia e da quantidade de movimento, sendo elas, equações diferenciais parciais de alto grau de complexibilidade. Os métodos analíticos convencionais não são capazes de encontrar a solução de tais equações, sendo necessária então a utilização dos métodos numéricos para esse fim.

Os métodos numéricos são algoritmos compostos por número finitos de operações que envolvem somente números, podendo ser operações aritméticas elementares, cálculo de funções, arbitragem de um valor, etc. Com o surgimento das ferramentas computacionais, esse tipo de análise tornou-se mais completa e com maior agilidade, se comparado com a resolução manual de expressões que descrevem o fenômeno (AZEVEDO, 2003).

Além disso, os resultados obtidos através das simulações realizadas em *softwares* permitem uma análise precisa do estudo em questão, pois permitem a inserção de condições de contorno que mais se aproximam da realidade (GONÇALVES, 2007).

Existem diversos tipos de métodos numéricos para resolução desse tipo de análise. O Método dos Elementos Finitos (MEF), do inglês *Finite Elements Method (FEM)* é o método adotado pelo *software ANSYS*. O MEF é muito utilizado para resolver problemas

ligados à área de engenharia, principalmente a engenharia de estruturas, pois traz como resultados a determinação do estado de tensão e deformação de um sólido (AZEVEDO, 2003).

O MEF consiste em dividir o domínio de análise do problema físico em subdomínios menores, para que a solução possa ser feita separadamente para cada subdomínio. A solução é baseada em integrações numéricas das equações diferenciais parciais através das séries de expansão de *Taylor*. Para cada subdomínio é efetuado o balanço de entrada, saída e geração das grandezas físicas e o final são somadas todas as soluções encontradas nos subdomínios para encontrar a solução do domínio como um todo. O conjunto dos pequenos elementos é chamado de malha, e, pode apresentar várias formas geométricas como triângulos, tetraedros e hexágonos. A qualidade da malha implica diretamente nos resultados, dessa forma é importante escolher a geometria de elemento de malha que melhor de adequa ao problema físico. Conhecendo cada elemento pequeno de forma individual, é possível analisar como funciona a estrutura completa (AZEVEDO, 2003).

3 METODOLOGIA

O *software ANSYS* é uma ferramenta poderosa para realização de análises numéricas de estruturas em várias áreas de estudo, em especial a área de análise de estruturas. Por ser um *software* tão vasto de funções de análises, antes de iniciar o trabalho foi preciso realizar um estudo acerca do funcionamento do *ANSYS*.

O *ANSYS WORKBENCH*^{TM} possui algumas ferramentas que são interligadas entre si. Para a realização do trabalho foi utilizada ferramenta *CFX*, que simula o comportamento do vento em um sistema.

O primeiro passo foi a utilização do *Design Modeler* que permite a criação da geometria dos modelos e do volume de controle que serão usados no estudo. Com a geometria criada, o segundo passo foi criar a malha da estrutura, com o auxílio do *Mesh*, que decide quão particionado o modelo será, e consequentemente, quão refinados serão os resultados apresentados.

Após a configuração da malha, o próximo passo é preciso definir as condições de contorno que irão moldar as análises efetuadas de forma condizente com o modelo em estudo, essa etapa é realizada no *Setup*. Determinas as condições de contorno é necessário solucionar o problema através do *solution*, e por fim, em *Results*, serão apresentados os resultados escolhidos.

Para calibração do método foi elaborado um modelo numérico com geometria em cúpula similar ao presente na NBR 6123 (1988). Foi desenvolvida uma cúpula esférica de raio 10 metros com a razão de flecha por diâmetro de 1/2, a fim de comparar as distribuições e os coeficientes de pressões sobre a cúpula do modelo com as distribuições e os coeficientes de pressões na cúpula da presente norma, validando assim a metodologia utilizada. O *software ANSYS* não oferece uma ferramenta que possibilite o cálculo de coeficientes de pressões externas, por isso foi necessário inserir, junto ao modelo, um cilindro com intuito de simular um tubo de *Pitot*. Foi criada, então, uma nova variável que calcula a razão entre a pressão total na cúpula (pressão efetiva) e a pressão de obstrução (pressão dinâmica) máxima no tubo de *Pitot*, obtendo assim os coeficientes de pressões externas conforme Figura 15, no item 5.

O presente trabalho apresentará uma comparação entre os efeitos de ventos gerados em um edifício convencional de planta retangular com quinas vivas e outro edifício convencional de planta retangular com quinas chanfradas, ambos submetidos as mesmas condições. A abordagem será baseada em um estudo numérico através de simulação

eletrônica de túnel de ventos, por meio da criação de modelos no *software* computacional *ANSYS*.

Para o primeiro caso de estudo recorre-se a um edifício de 60 metros de altura, com planta retangular de 10x20 m² com arestas verticais em quinas vivas, e, será verificada a incidência dos ventos à 0º e à 90º, conforme especificado pela NBR 6123 (1988). Para o segundo caso será utilizado um edifício com as mesmas características do primeiro, porém agora aplicando-se uma curvatura sobre as arestas verticais da geometria com raio de 2 metros. Nesse modelo também será verificado a incidência dos ventos à 0º e à 90º.

No estudo de caso foi aplicado uma redução na escala 1:100, com a finalidade de obter maior rapidez no processamento da solução. A decisão é válida quando se mantém a mesma geometria da edificação real e também mantida as mesmas condições físicas. Esta decisão foi tomada no sentido de se reduzir os números de nós da malha do modelo, diminuindo consideravelmente o tempo de processamento da análise. Para tanto, seguiu-se as condições de semelhança descritas na seção 2.1.6 deste trabalho.

Para melhor entendimento, a caracterização dos modelos numéricos analisados neste trabalho está descrita na Tabela 1, e as dimensões reais dos modelos 1 e 2 na Tabela 2.

Tabela 1- Caracterização dos Modelos

Caracterização dos Modelos	
Modelo	Descrição
Calibração	Cúpula
Modelo 1	Prédio Retangular com Quina Viva
Modelo 2	Prédio Retangular com Quina Chanfrada com raio igual a 2 metros.

Fonte: Autores

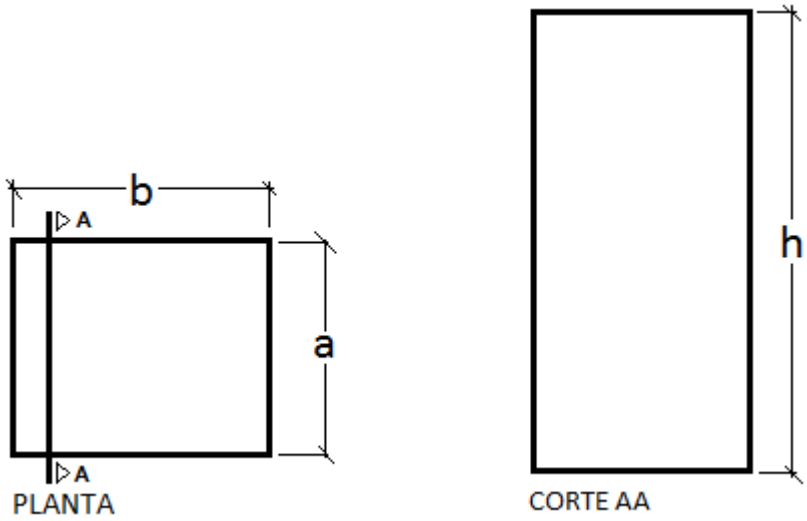
Tabela 2 – Dimensões das Edificações

Dimensões dos Modelos 1 e 2 em Escala Real		
Parâmetros	1	2
a (m)	10,00	10,00
b (m)	20,00	20,00
h (m)	60,00	60,00
A (m²)	200,00	200,00

Fonte: Autores

Os parâmetros a, b e h, as maiores dimensões dos modelos 1 e 2, são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros a,b e h para os Modelos Numéricos



Fonte: Autores.

Como os modelos são genéricos e podem estar presentes em qualquer região, adotou-se as velocidades de escoamento para os modelos 1 e 2 de 45 m/s, maior valor de velocidade indicada na Isopleta da NBR 6123:1988.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

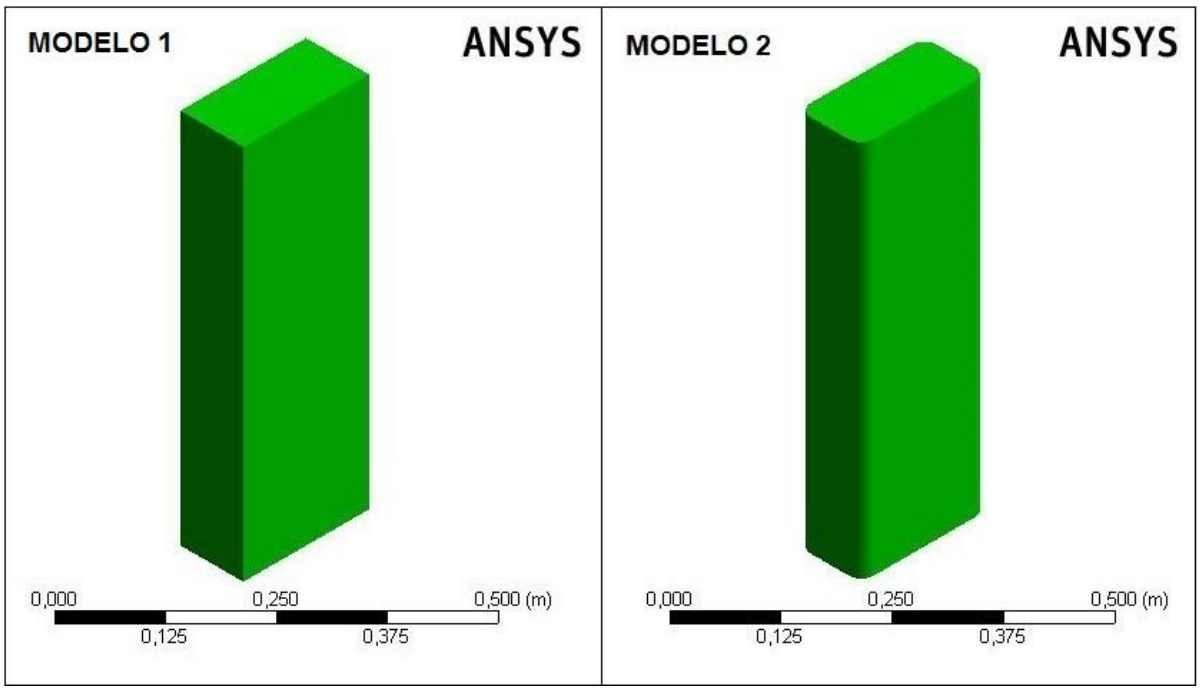
Durante a realização das simulações propostas, foi preciso determinar alguns parâmetros durante as três fases iniciais. Estes parâmetros estão explicados detalhadamente abaixo.

4.1 Geometria

Apesar de o *ANSYS* permitir a importação de geometrias realizadas em outros *softwares*, neste trabalho optou-se por construir os modelos dos dois edifícios dentro do próprio *software* devido à simplicidade e facilidade de execução da geometria.

Veja na Figura 8 que os dois edifícios apresentam as mesmas dimensões: 10 metros de largura, 20 metros de comprimento e 60 metros de altura, o que os diferenciam é que um apresenta um chanfro com raio de 2 metros.

Figura 8 – Geometrias dos Modelos 1 e 2

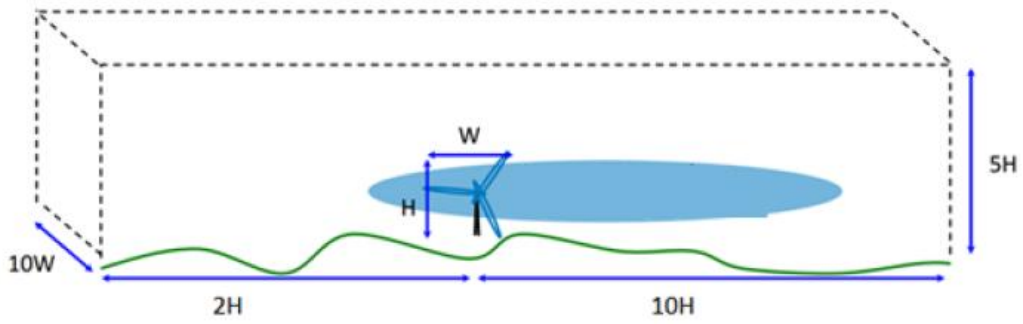


Fonte: Autores.

Após a concepção da geometria, é preciso determinar a região por onde o fluido irá escoar. Para a criação deste domínio de análise é preciso determinar uma região ao redor do modelo analisado. Esse domínio de análise deve apresentar dimensões suficientes para que represente de forma precisa o comportamento e as zonas de influência ao longo do edifício. O

próprio *ANSYS* estabelece um critério para ser obedecido durante a determinação das dimensões dos domínios de análise conforme a Figura 9.

Figura 9 – Recomendação do *ANSYS* para Dimensões dos Domínios de Análise

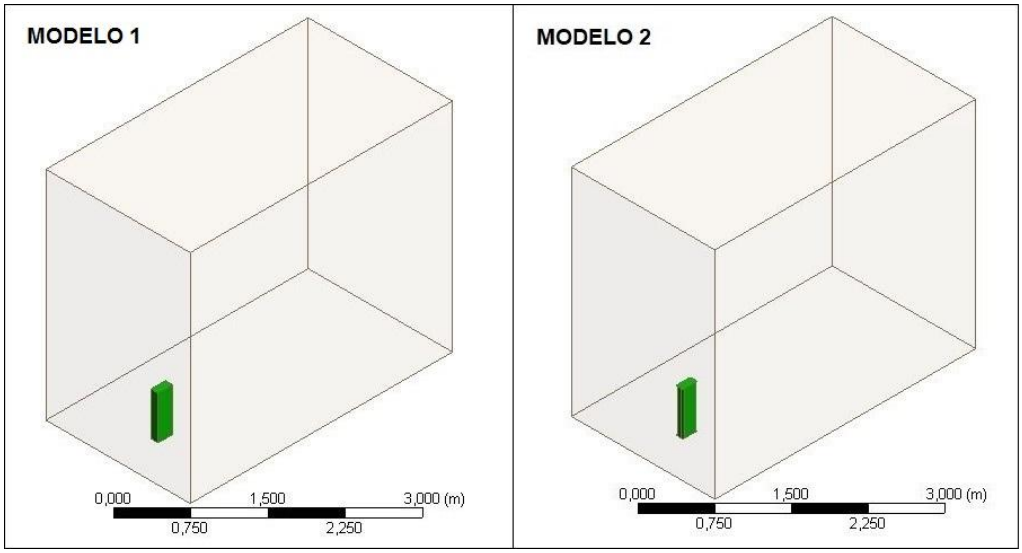


Fonte: *ANSYS*.

Como representado na Figura, as dimensões desse volume de controle são baseadas nas dimensões dos dois edifícios. Foi adotado um volume de controle retangular com 200 metros de largura, 360 metros de comprimento e 300 metros de altura. Obedecendo, então, a recomendação proposta por Irwin (2013) que a obstrução máxima da área de projeção da geometria do modelo não deve ultrapassar 10% da área do transversal do volume de controle, de forma a evitar a interferência do fluxo entre o modelo e as paredes do túnel de vento. Nos modelos analisados neste trabalho, a relação entre a área de obstrução da geometria do modelo em relação à área do domínio ficou em torno de 1%.

Na Figura 10 abaixo observa-se os Modelo 1 e 2 inseridos em seus volumes de controle, representando, respectivamente, o edifício com quinas vivas e o edifício com quinas chanfradas.

Figura 10 – Modelo 1 e 2 em Seus Volumes de Controle

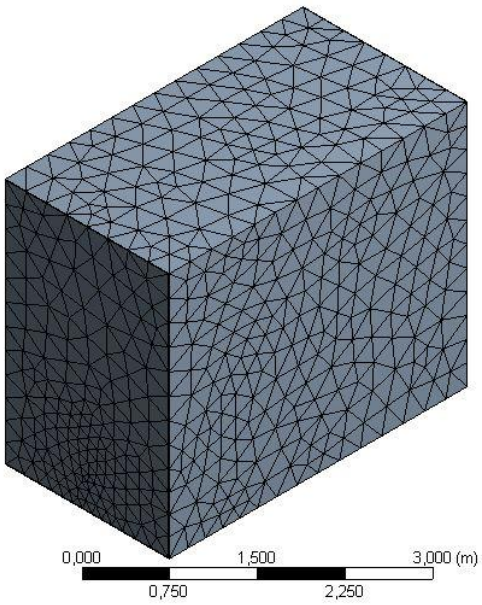


Fonte: Autores.

4.2 Malha

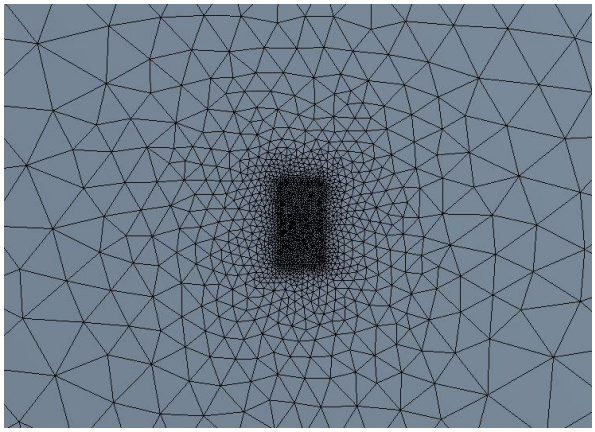
Com a geometria e o volume de controle definidos, é preciso criar a malha do modelo. A eficiência dela está intimamente relacionada com a qualidade dos seus elementos e se há uma boa suavização na transição entre as suas camadas (NEGRI, 2017). O refinamento da malha é uma etapa importante no processo, pois interfere diretamente nos resultados obtidos. Sendo assim o refinamento depende do tipo elemento escolhido, por consequência a sua quantidade, e da capacidade de processamento computacional. A modelagem foi realizada com a ferramenta *Mesh*, e dentre as opções disponíveis, optou-se por usar a malha do tipo tetraédrica, que de acordo com Galter (2015) esse tipo de elemento proporciona uma solução mais automatizada e possui melhor conformidade dentro do modelo garantindo melhores resultados em pontos críticos quando comparado com outros tipos de elementos. A Figura 11 apresenta a malha criada para o domínio de análise e a Figura 12 mostra o refinamento dessa malha na região do edifício.

Figura 11 – A Malha do Volume de Controle



Fonte: Autores.

Figura 12 – Detalhe do Refino da Malha dos Modelos 1 e 2



Fonte: Autores

Dentro da ferramenta *Mesh* deve-se ainda determinar algumas informações referentes a malha para prosseguir com a solução, uma delas é sobre a camada limite. Para a camada limite é preciso determinar alguns parâmetros, entre eles estão a espessura da camada limite, a taxa de expansão e o número de subcamadas presentes na camada limite.

Para o cálculo da espessura máxima da camada limite, primeiro é preciso determinar o raio hidráulico (Dh) e o número de *Reynolds* cujas expressões estão descritas abaixo:

$$Dh = \frac{4 * A}{(2 * a) + (2 * b)} \tag{6}$$

Onde:

Dh = L = Raio hidráulico (m);

A = Área transversal do volume de controle ao escoamento (m^2);

a = Dimensão horizontal da seção transversal do volume de controle ao escoamento (m);

b = Dimensão vertical da seção transversal do volume de controle ao escoamento (m);

$$Re = \frac{V * Dh}{\upsilon} \tag{7}$$

Onde:

$L = Dh$ - Raio hidráulico em metros (m);

Re = Número de Reynolds (adimensional);

V = Velocidade do escoamento (m/s);

υ = Viscosidade de cinemática do ar, considerada igual a 0,0000156 m²/s.

$$\delta = 0{,}035 * L * Re^{-1/7} \tag{8}$$

δ = Espessura da camada limite (m).

O espaçamento mínimo existente entre a primeira subcamada da camada limite (Δy) é descrito pela equação a seguir:

$$\Delta y = Dh * \sqrt{74} * Re^{-13/14} \tag{9}$$

Para o cálculo da taxa de expansão é preciso conhecer o espaçamento mínimo entre a primeira subcamada da camada limite e a espessura da camada. O cálculo é realizado a partir da Equação 10, e foi encontrado um valor maior que o valor máximo recomendado pelo *ANSYS CFX-Solver* de 1,2 que garante uma suave transição entre as camadas, por isso foi adotado o valor de 1,2.

$$Te = \left(\frac{\delta}{\Delta y}\right)^{1/14} \tag{10}$$

Onde:

Te = Taxa de expansão (adimensional).

Por fim, o número mínimo de camadas que devem ser inseridas na camada limite deve variar entre dez e quinze. Neste trabalho foi adotado o valor 15.

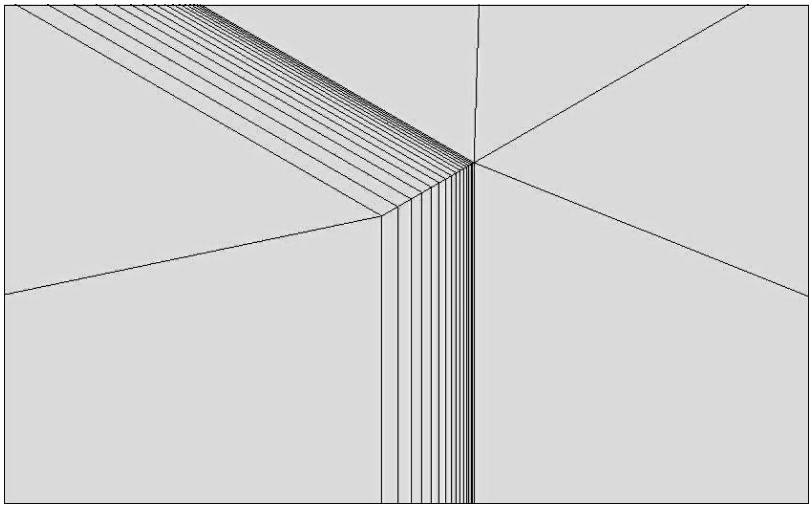
Segue Tabela 3 com o detalhamento dos parâmetros encontrados para determinação da camada limite e a Figura 13 ilustrando a camada limite para os domínios de análise.

Tabela 3 – Parâmetros para Cálculo da Camada Limite para os Modelos Reduzidos

Parâmetros da Camada Limite para os Modelos Reduzidos								
Modelo	a (m)	b (m)	A (m²)	Dh (m)	Re	Δy (m)	δ (m)	Te
Calibração	0,20	0,20	0,0157	0,80	2,31E-06	8,39E-06	0,0035	1,2
Modelo 1	0,10	0,20	0,02	2,40	6,92E-08	9,18E-06	0,0089	1,2
Modelo 2	0,10	0,20	0,02	2,40	6,92E-08	9,18E-06	0,0089	1,2

Fonte: Autores

Figura 13 – Detalhes da Camada Limite



Fonte: Autores

4.3 Condições de contorno

A configuração das condições de contorno da simulação é realizada na ferramenta *Setup* do *CFX*. O método numérico escolhido para a análise dos regimes turbulentos foi o *SST* (*Shear Stress Transport*). Para esta análise, considerou-se o fluido incompressível e escoando em regime laminar. Foi escolhida a temperatura de 25ºC e pressão atmosférica de 1 atm.

Nessa etapa do processamento deve-se determinar se a simulação ocorrerá em regime transiente ou estacionário, o tempo de incidência do fluido no modelo, a determinação do limite de controle dos resíduos, entre outros parâmetros. Neste trabalho, as análises foram realizadas em regime transiente, com tempo de incidência de 3 segundos e com controle de resíduos da equação (*RMS*) na ordem de 10^{-5}. Os outros parâmetros escolhidos serão detalhados na Tabela 4 abaixo, esses são iguais para os dois modelos para efeito de comparação.

Tabela 4 – Condições de Contorno

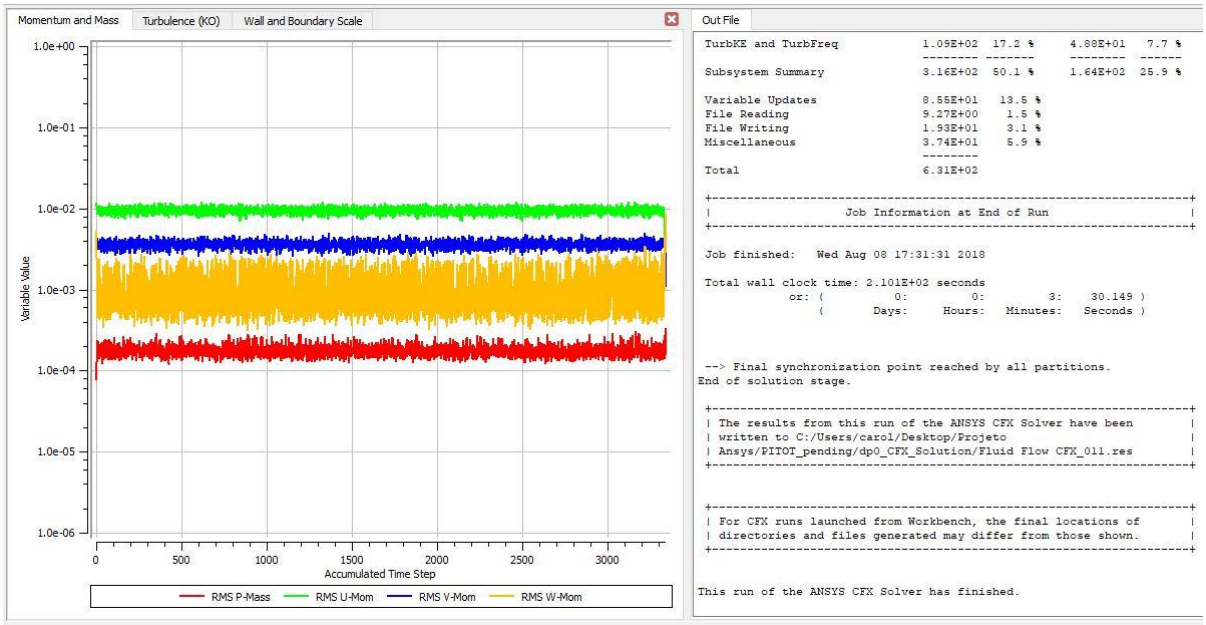
Configurações das Condições de Contorno para Análises dos Modelos 1 e 2	
Default Domain	Entrada/Saída/Piso/Parede/Edifício
Turbulence Model	*Shear Stress Transport* – SST
Convergence Control	Mín. coef. loops = 1 / Máx. coef. loops = 100
Convergence Criteria	*Residual type* = RMS / *Residual target* = 1.0 E-5
Analysis Type	*Transient*
Initialization	*Cartesian velocity components*: u=45; v=0 m/s; w=0 / *Relative pressure* = 0 *Turbulence = medium intensity:* 5%
Wall Function	*Automatic*

Fonte: Autores

4.4 Solução

O cálculo das equações e o processamento dos dados da simulação ocorrem na opção *Solution* no *CFX* do *ANSYS*. Nessa parte é preciso definir de que maneira ocorrerá o processamento, critério esse que deve levar em conta a capacidade computacional utilizada. Durante o processamento, uma tela é aberta mostrando um gráfico de convergência de um lado da tela, e do outro aparece informações sobre os cálculos em cada iteração realizada, além de algumas informações definidas para o modelo, como o número de nós e a qualidade da malha.

Figura 14 – Resultados do Processamento *Fluid Flow (CFX) Solution*



Fonte: Autores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

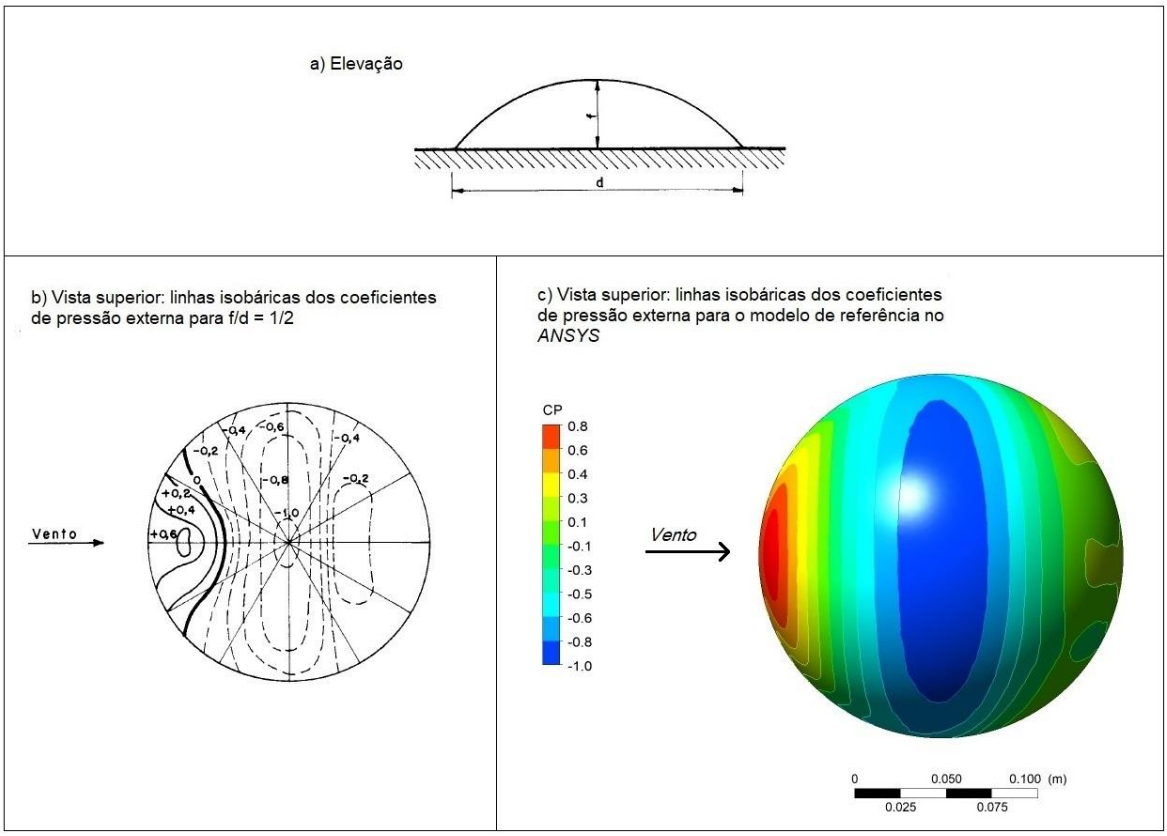
O *ANSYS* permite que se escolha variados tipos de resultados possíveis de serem observados ao fim da execução de cada simulação. Cada *plugin* é responsável por gerar resultados específicos. Neste trabalho, foi utilizado apenas o *plugin Fluid Flow (Fluent)* e foram escolhidos resultados em relação a velocidade e pressão apresentadas pelo vento, e apresentados por meio de um sistema de diferenciação de intensidade de cores. Serão abordados tais resultados para cada direção de incidência que os modelos foram submetidos.

5.1 *Fluid Flow (CFX)*

5.1.1 *Contour* – Pressões

No primeiro momento serão analisados os resultados de distribuições e os coeficientes de pressão para o modelo de calibração em comparação com a NBR 6123 (1988). Veja na Figura 15 que os valores encontrados para o modelo de calibração possuem boa aproximação com os valores da norma, respeitando corretamente as regiões de sobrepressão e sucção.

Figura 15 – Distribuições e coeficientes de pressão do modelo de calibração frente à NBR 6123 (1988)



Fonte: Autores e NBR 6123 (1988).

Tendo em vista que os resultados obtidos para o modelo de calibração se aproximaram dos valores da norma, entendeu-se que a metodologia utilizada estava correta. Dessa forma deu-se prosseguimento as analises para os modelos 1 e 2.

Para a incidência do vento a 0º serão analisadas as pressões com base no contorno das camadas sobre o modelo em que cada cor representa um intervalo de pressões. Valores negativos representam as pressões negativas (sucção) e os valores positivos representam as pressões positivas (sobrepressão). Os valores limites de sucção e sobrepressão estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Pressões Máximas e Mínimas para Vento 0º

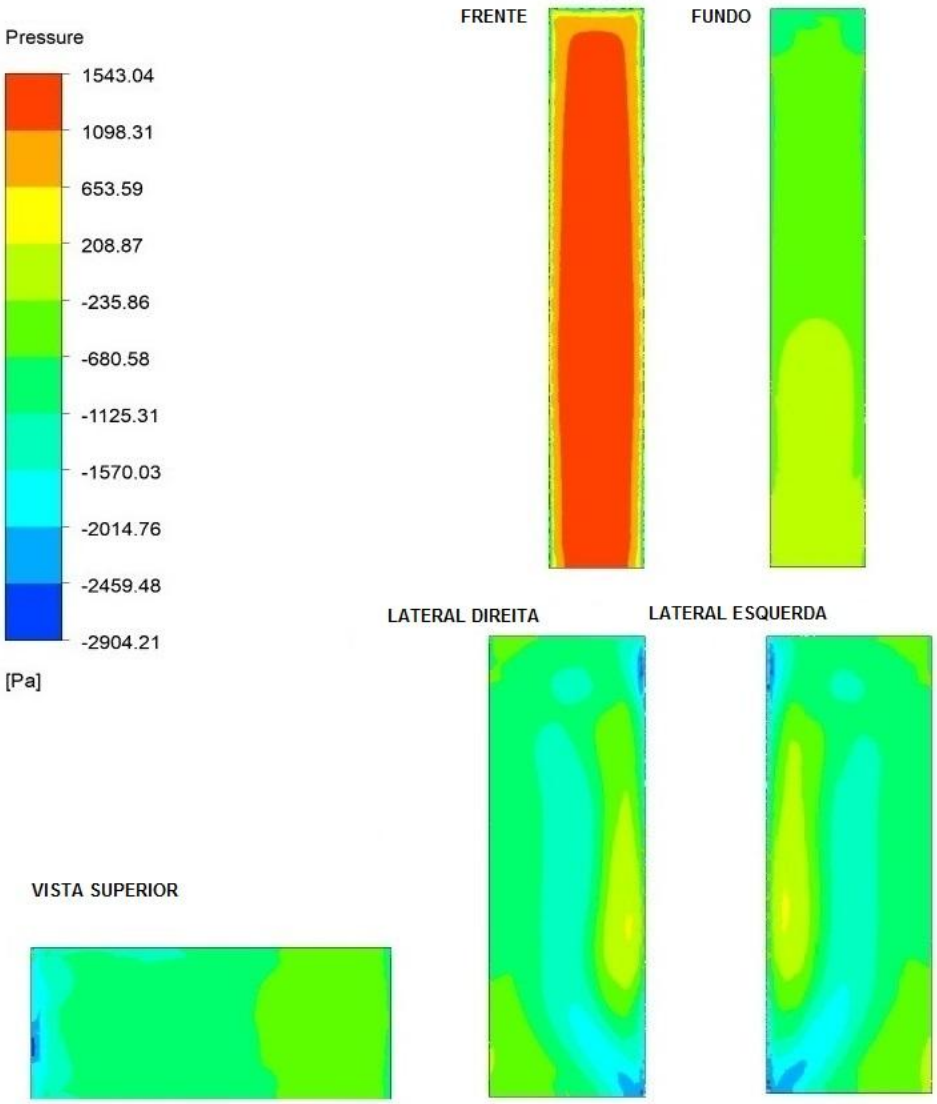
Modelo	**Pressão máxima (kPa)**	**Pressão mínima (kPa)**
1	1,543	-2,904
2	1,354	-4,566

Fonte: Autores.

A Figura 16 mostra as distribuições de pressão para o Modelo 1. Nota-se que na fachada onde o vento incide, existe uma grande área de sobrepressão. Nas laterais há uma falta de uniformidade nas distribuições de pressões que são devidas as regiões de turbulência e vorticidade em que os ventos possuem trajetórias aleatórias formando assim vários pontos de sucção. A região do sotavento apresentou suas regiões de sucção bem definidas, variando de valores mais negativos no topo para valores menos negativos em sentido a base.

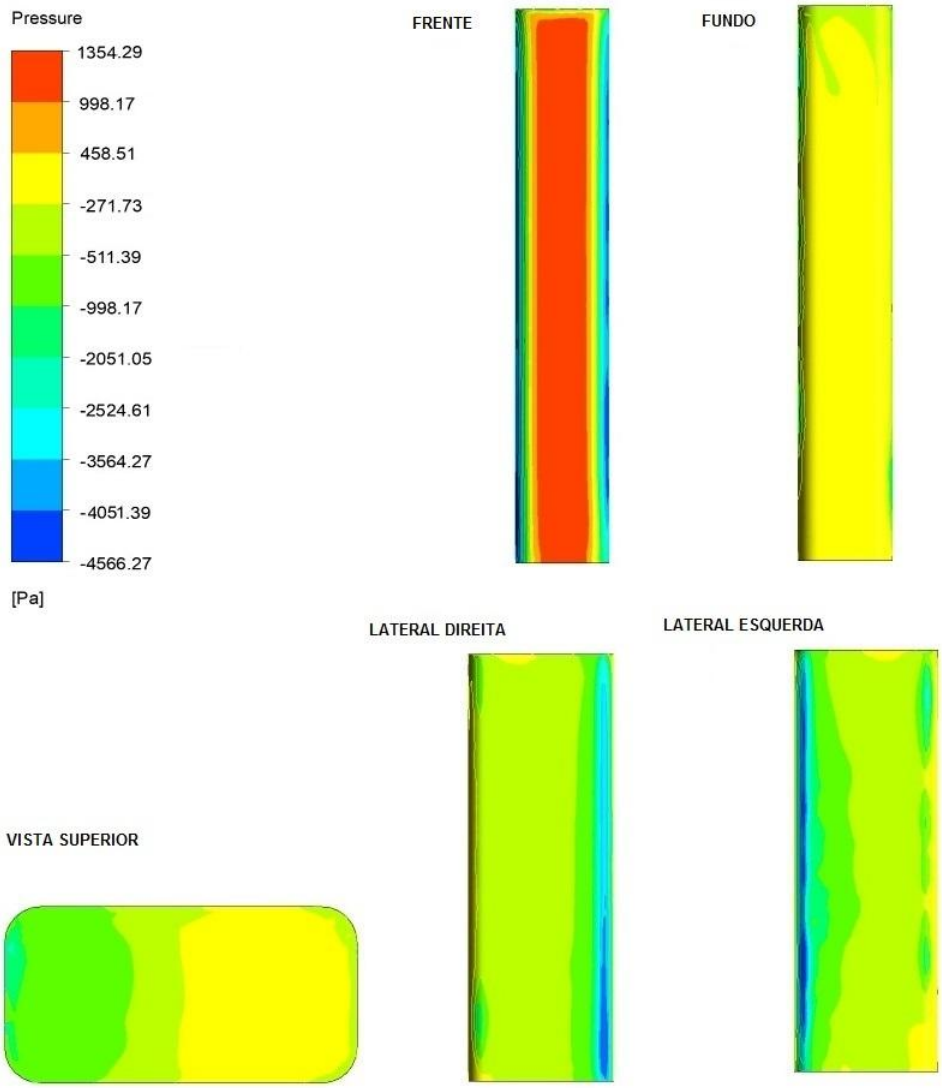
Para o modelo 2 as transições entre as camadas de pressões foram mais uniformes, deixando bem definidas as regiões de sobrepressão e de sucção, conforme a Figura 17. Isso se deve ao fato de não ter ocorrido desprendimento do fluido no corpo da estrutura que ocasionalmente não permite a formação de zonas turbulentas. Na região do sotavento nota-se valores menos negativos do que no modelo 1, o que configura uma menor ação dos efeitos de sucção na região.

Figura 16 – Contorno de Pressões para o Modelo 1



Fonte: Autores.

Figura 17 – Contorno de Pressões para o Modelo 2



Fonte: Autores.

A partir de agora serão analisadas as pressões geradas devido à incidência do vento a 90º. A Tabela 6 mostra os valores extremos de pressões para os dois modelos.

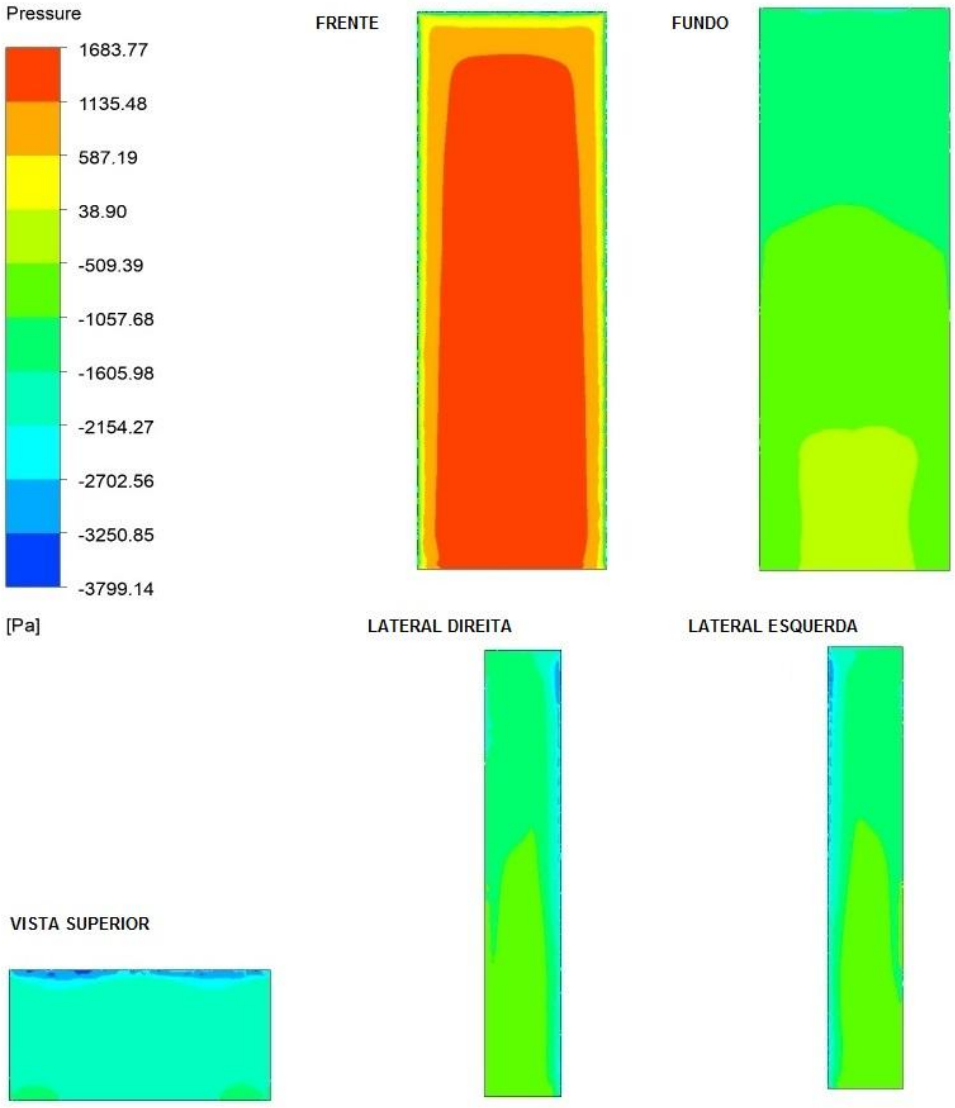
Tabela 6 – Pressões Máximas e Mínimas para Vento 90º

Modelo	**Pressão máxima (kPa)**	**Pressão mínima (kPa)**
1	1,683	-3,799
2	1,513	-6,418

Fonte: Autores.

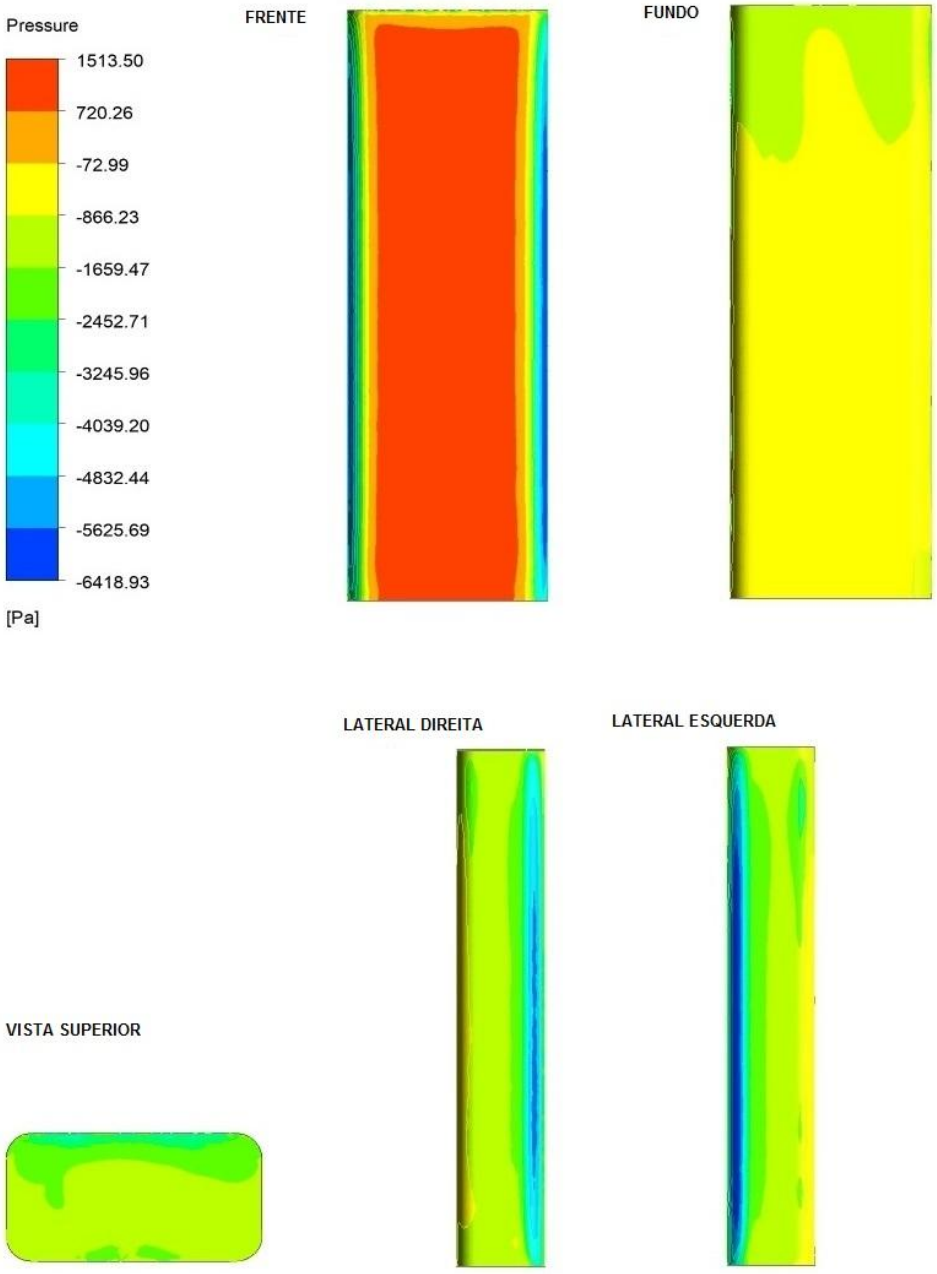
Os mesmos fenômenos foram observados nos dois modelos para o vento a 90º. Sendo que neste caso, houve um aumento dos valores de pressões, uma vez que a área de incidência do vento foi aumentada. Observe pelas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Contorno de Pressões para o Modelo 1



Fonte: Autores.

Figura 19 – Contorno de Pressões para o Modelo 2



Fonte: Autores.

5.1.2 *Streamlines* – Velocidades

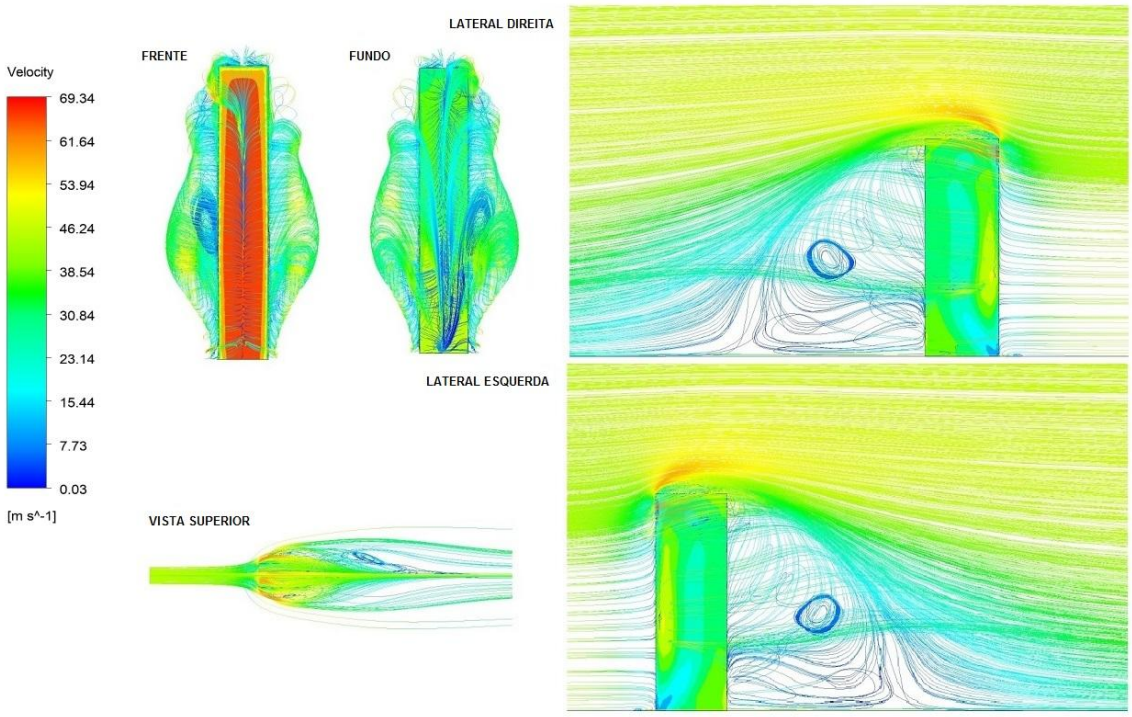
Em primeiro momento será mostrada as análises de vento a 0º para os dois modelos. As análises de velocidade são realizadas por *streamlines* que representam linhas de fluxo distribuídas que permitem observar a interação fluido-estrutura que ocorreram na simulação, deixando evidentes os efeitos de separação, esteiras e vórtices.

Para os modelos 1 e 2, a velocidade de entrada foi de 45 m/s, porém para o modelo 1 ela atingiu valor máximo de aproximadamente 70 m/s enquanto para o modelo 2 de aproximadamente 96 m/s, valores relativamente altos reforçados pela incidência do vento sobre as quinas vivas da edificação, representados respectivamente pelas Figuras 20 e 21.

Para o modelo 1 existem três zonas de separação (afastamento do fluido do sólido) nas arestas laterais e superior do edifício. Já para o modelo 2 observa-se esse fenômeno apenas na aresta superior onde não foi chanfrado, nas arestas laterais o fluido se mantém aderido a estrutura. Nas zonas de separação foram onde ocorreram os valores máximos de velocidades, como observado nas Figuras.

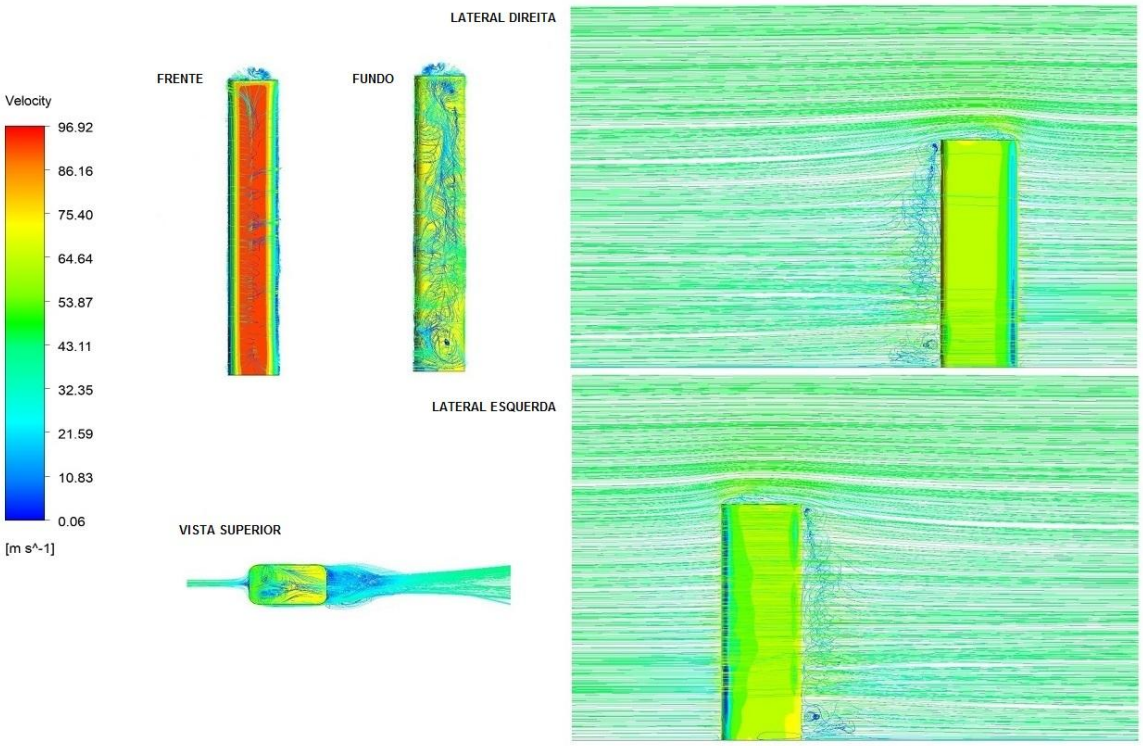
Nas regiões laterais, superior e no sotavento do modelo 1 há o surgimento de turbulência e vorticidade observados pela presença de redemoinhos. No modelo 2 isso ocorre apenas na parte superior e no sotavento. Na região do barlavento é notável que a região de turbulência e vorticidade para o modelo 1 é muito maior do que para o modelo 2 que apresenta esse fenômeno de maneira bem mais suavizada.

Figura 20 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 1



Fonte: Autores.

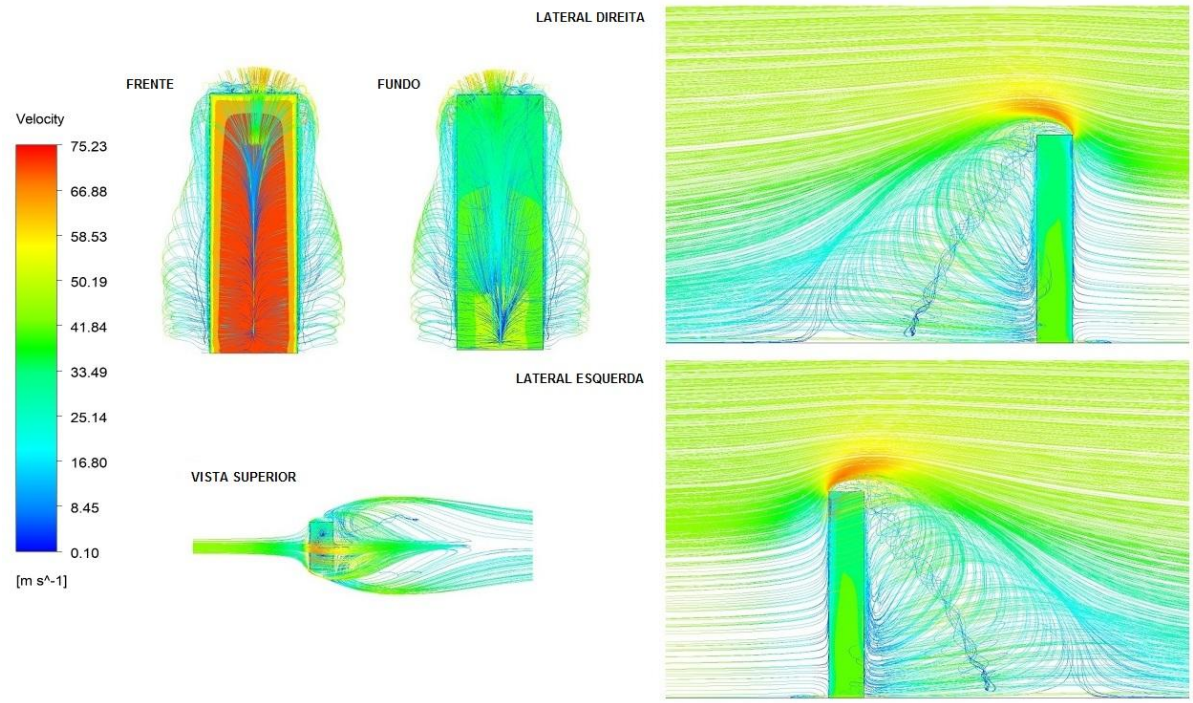
Figura 21 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 2



Fonte: Autores.

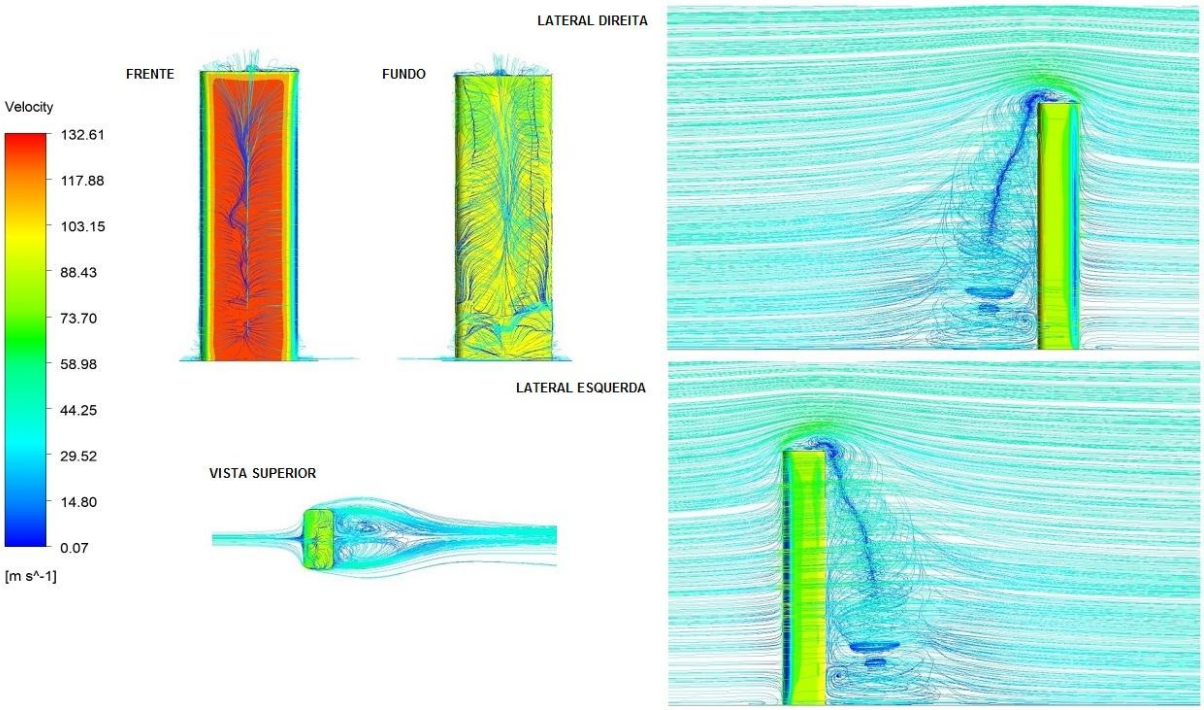
Para análise do vento a 90º os resultados obtidos são similares aos resultados a 0º, pois, são analisados aqui os efeitos sobre edifícios de planta retangular, ou seja, o que muda na análise é apenas a área de obstrução transversal, mas as características dos fenômenos observados no vento a 0º se preservaram. Observe as Figuras 22 e 23, como a área de obstrução transversal é maior para essa análise, os valores numéricos das velocidades, e as regiões de vórtices e turbulências também são maiores.

Figura 22 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 1



Fonte: Autores.

Figura 23 – Distribuição de Velocidade para o Modelo 2



Fonte: Autores

6 CONCLUSÃO

Os edifícios de múltiplos andares apesar de serem uma solução para o problema de espaço que sociedade atual sofre, deve-se atentar aos esforços que atuam sobre eles e, assim, a melhor forma de dimensioná-los de forma segura e econômica. A realização deste trabalho mostrou que utilização de *softwares* para realizar análise dinâmica para avaliar o estudo da interação fluido estrutura foi bastante válida e trouxe resultados interessantes.

O objetivo do trabalho busca identificar e caracterizar a formação de vórtices e de regiões de sobrepressões em cada um dos modelos estudado, comparando-os em seguida. Para validação dos resultados, usou-se um modelo de calibração para comparação dos resultados com a NBR 6123 (1988), e nesse sentido constatar-se a validade dos valores encontrados.

Assim, o uso da ferramenta computacional *ANSYS* mostrou-se eficiente por ter entregado um resultado satisfatório com as visualizações das *streamlines* que representaram perfeitamente os vórtices de base e de topo, em concordância com o comportamento esperado. A avaliação dos contornos de pressões também foi um bom resultado, visto que foi possível visualizar no *software* de forma clara o efeito das regiões de sobrepressões nas paredes dos edifícios. Mostrando, então, que a ação do vento é diretamente responsável pela formação das sobrepressões, que com a influência dos vórtices, geram-se zonas de sucção.

Ao realizar o trabalho, era esperado que o edifício de quinas chanfradas apresentasse características de velocidades e pressões bem mais comportadas quando comparadas com as características do edifício de quinas vivas. Esse comportamento foi evidenciado através das simulações realizadas no *software*, e, consequentemente dos resultados encontrados. Pode-se afirmar então, que uma boa alternativa para atenuar os efeitos de vento em edifícios de múltiplos andares seja o uso de quinas chanfradas em seu projeto.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho ainda pode ser desenvolvido em alguns aspectos, estes são dispostos a seguir como sugestões para trabalhos futuros:

- Adição de um cilindro simulando um tubo de *Pitot* a fim de analisar os coeficientes de pressão externos frente à NBR 6123 (1988) nos modelos 1 e 2;
- Realizar a simulação considerando as velocidades do vento variando com a altura do edifício;
- Análise estática (tensões e deformações) dos Modelos 1 e 2;
- Criar um edifício com aberturas para estudar os efeitos dos coeficientes de pressões internas;
- Realizar ensaio experimental para efeito de validação dos resultados;
- Desenvolvimento de um manual de utilização do *software ANSYS* para a simulação de túnel de vento eletrônico em geometrias diversas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS CFX-Solver Modeling Guide Ansys, Inc. Realease 16.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS. **NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.

AZEVEDO, A. F. M. Introdução. In: AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2003.

BELLEI, Lldony H.; PINHO, Fernando 0.; PINHO, Mauro 0.. **EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES EM AÇO.** 2. ed. São Paulo, Sp: Editora Pini Ltda., 2008. 555 p.

BLESSMANN, J. **Ação do Vento em Telhados**. Porto Alegre, Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 368 p.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

CAFFARELLO, Flávio Meireles. **Análise Estrutural de Cobertura em Gridshell de Madeira.** 2016. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 2016.

FERRAZ, Henrique. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos - Sp, n. 22, p.1-16, 06 mar. 2005. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%20A%C7O%20NA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2018.

FORNEL, Guilherme Fiorin. **AÇÃO DE VENTO EM PAVILHÕES PARA USOS GERAIS.** 2016. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Tradução e revisão de Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GALTER, M. D. **Ações do vento em casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2015. Disponível em: <http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258132/1/Galter_MarceloDeperon_M.pdf>. Acesso em: 12 Jun. 2018.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não Estruturadas**. Tese (Mestre em Engenharia Matemática) – Departamento de Matemática Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007. Disponível em:< http://www.dcc.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_050370159.pdf>. Acesso em: 10 Jun. 2018.

GONÇALVES, R. M. *et al.* **Ação do Vento nas Edificações**. Teoria e Exemplos. 2ª ed. São Carlos: SET/EESC/USP, 2007.

GRALA, Pedro. **CHAMINÉS INDUSTRIAIS: SOLUÇÕES PARA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES.** 2013. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

IRWIN, P.; DENOON. R.; SCOTT. D. **Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings**. 1ª ed. Illinois Institute of Technology, Routledge, New York, 2013. Disponível em: <https://store.ctbuh.org/PDF_Previews/Books/2013_WindTunnelGuide_Preview.pdf>. Acesso em: 01 Jul. 2018.

MANFRIM, S. **Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas à Ação do vento em Edificações Industriai**s. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91483>. Acesso em: 05 Jun. 2017.

MOREIRA, G. A. A. **Desenvolvimento de Modelos de Camada Limite Atmosferica Aplicados a Micro-Regiões**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8ZSMPY>. Acesso em: 13 Jun. 2018.

NEGRI, J.F.G. **Efeitos de Vizinhança nas Ações do Vento em Edifícios com Cobertura em Duas Águas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil. 2017

PITTA, J.A.A. **Ações Devidas ao Vento em Edificação de Andares Múltiplos, Edifícios com Coberturas do Tipo *Shed* e do Tipo duas Águas com Lanternim**. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91483>. Acesso em: 06 Jul. 2018.

REZENDE, A. L. T. **Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**. Tese (Dourado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.pucrio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=14607@1>. Acesso em: 15 Jun. 2018.

RIOS, M. P. **Efeito de Amortecedores no Comportamento Dinâmico de Edifícios Altos Sob Cargas de Vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: < http://www.civ.pucrio.br/wpcontent/view/down_pdf.php?pdf=../pdf/2015_Marina_Polonia_Rios.pdf>. Acesso em: 08 Jun. 2018.

RODRIGUES, B.B.; SOUZA, D.F.A. e BAFFA, M.C.C. **Simulação de Túnel de Vento Eletrônico em Edifícios Industriais com Cobertura Tipo Duas Águas, Arco e *Shed***. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC.UFVJM. 2018

SCHILESTEL, R. **Modeling and Simulation of Turbulent Flows**. Wiley-ISTE, EUA, 2008.

SILVEIRA-NETO, A. **Turbulência nos Fluidos Aplicada**. Apostila, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

TARANATH, B. Structural analysis and design of tall building. New York, EUA: Mc Graw Hill Book Company, 1988.

TÉCHNE. São Paulo: Pini, v. 146, mar. 2010. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/156/engenharia-do-vento-alem-das-reacoes-da-estrutura-dos-286688-1.aspx>. Acesso em: 10 jul. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI. Sistema de Bibliotecas. **Manual de Normatização: Monografias, Dissertações e Teses.** 2ª ed. Diamantina, 2016. Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/bitstream/1/936/10/manual_normalizacao_2016.pdf>. Acesso em: 20 Jul. 2018.

VANIN, D. D. **Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Frente à Ação do Vento:** Comparação de Técnicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponivel em:<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/56587>. Acesso em: 16 Jun. 2018.

UFVJM