

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA SIMULAÇÃO DA  
CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM UMA TOPOGRAFIA COMPLEXA EMPREGANDO A  
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

por

Anderson Werner Vieira Costa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA SIMULAÇÃO DA CAMADA  
LIMITE ATMOSFÉRICA EM UMA TOPOGRAFIA COMPLEXA EMPREGANDO A DINÂMICA  
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

por

Anderson Werner Vieira Costa

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Fenômenos de Transportes**

Orientador: Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Dall'Onder

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2012.

- DEDICATÓRIA;

Dedico este trabalho á minha família, principalmente aos meus pais Marco Antonio e Sonia Luiza, que amo muito, e que desde meu nascimento ajudaram a me tornar a pessoa que sou hoje. Também minha irmã Andressa, companheira nas horas boas e ruins.

Também pude conhecer uma pessoa muito especial durante este período, a quem faço dedicação especial, minha namorada Fabiane, que durante este difícil caminho que tive pela Engenharia Mecânica, sempre esteve presente e acompanhou mais de perto todas as lutas e dificuldades.

Também dedico a toda família e amigos, que de uma maneira ou de outra fizeram parte de minha história e sempre me apoiaram.

- AGRADECIMENTOS;

À minha prezada professora orientadora neste trabalho, Adriane Prisco Petry, pelo conhecimento transmitido durante o curso, e também pela ajuda na idealização deste trabalho, sempre com muita simpatia, dedicação e respeito.

Ao meu amigo e um dia colega de curso, Eng<sup>o</sup> Dalmedson Freitas, por sua dedicação e empenho em me auxiliar ao longo do desenvolvimento deste trabalho, visto que o mesmo foi embasado em sua dissertação de mestrado, na área de energia eólica. Aos professores e colegas do curso de Engenharia Mecânica da UFRGS, que sempre buscando o melhor aprendizado, se dedicaram junto a mim durante o percurso. Ao amigo Gustavo Fleck do GESTE, pela parceria e apoio no uso do software.

Por fim, agradeço ao CESUP pela disponibilidade dos recursos computacionais que possibilitaram este trabalho, e ao serviço de apoio ao usuário sempre muito solícito.

COSTA, A.W.V. **Análise da Influência da Rugosidade Superficial na Simulação da Camada Limite Atmosférica em Uma Topografia Complexa Empregando a Dinâmica dos Fluidos Computacional**. 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico do escoamento do ar sobre um modelo reduzido de um terreno complexo empregando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Tendo como foco a análise da influência de diferentes valores de altura de rugosidade superficial para um escoamento de vento sobre um modelo de geometria complexa, através de simulação numérica por CFD são avaliados os perfis de velocidade para diferentes alturas em pontos pré-definidos, a montante e à jusante do morro principal contido no modelo reduzido onde o escoamento de vento é simulado, para cada valor de rugosidade.

Estas verificações foram sugeridas em uma dissertação de mestrado, onde foram feitas simulações do escoamento de vento sobre um modelo computacional reduzido de um terreno de uma região acidentada, utilizando diferentes modelos de turbulência. Os resultados foram comparados com os dados obtidos em um experimento em túnel de vento.

A simulação numérica realizada procura reproduzir as condições do experimento, contudo a definição do parâmetro de rugosidade superficial é difícil, devido à forma como os modelos são construídos experimentalmente, sendo assim necessária uma investigação numérica deste parâmetro. A partir da análise da influência da altura de rugosidade nos resultados numéricos, pretende-se contribuir para a correta definição dos parâmetros de modelagem numérica para reprodução correta das condições experimentais, e maior aproximação dos resultados obtidos no experimento, principalmente na região de separação da camada limite.

As equações fundamentadas na mecânica dos fluidos são resolvidas em uma plataforma computacional, onde um escoamento de vento típico é simulado atravessando o volume de controle, que engloba a região em análise, referente a um modelo reduzido representativo do Morro do Jaburu, localizado em Vitória, no estado do Espírito Santo, Brasil; e traçado através de suas curvas de nível.

A análise é feita através do software de simulação fluido dinâmica ANSYS Fluent 13.0, a partir de um modelo computacional já definido. As simulações são realizadas no centro de supercomputação (CESUP) da UFRGS.

Após as simulações, são obtidos dados da distribuição de velocidade sobre o terreno, e dos perfis de velocidade em relação à altura, em pontos localizados em um plano vertical longitudinal do modelo simulado. Os resultados são comparados com as informações numéricas e experimentais anteriormente publicadas. Importantes alterações dos resultados na região de separação da camada limite são observadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** (rugosidade superficial, escoamento de vento, mecânica dos fluidos, simulação numérica)

Costa, A.W.V. **Analysis of the Influence of Surface Roughness on the Simulation of Atmospheric Boundary Layer in A Complex Topography Using the Computational Fluid Dynamics**. 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

This work presents a numerical study of the air flow on a scale model of a complex terrain using Computational Fluid Dynamics (CFD). Focusing on the analysis of the influence of different values of roughness height for a wind flow over a model of a complex terrain geometry by numerical simulation by CFD, are evaluated velocity profiles in predefined points, upstream and downstream of the main hill contained on the reduced model, where the wind flow is simulated, for each value of roughness. These checks were suggested in a dissertation, where wind flow simulations were made over a reduced computational model of a terrain of a rugged region, using different turbulence models. The results were compared with data obtained in an experiment in a wind tunnel. The numerical simulation performed seeks to reproduce the conditions of the experiment; however is difficult to define the parameter of surface roughness, due to the way the models are constructed experimentally, and therefore require a numerical investigation of this parameter. From the analysis of the influence of roughness height on the numerical results, is intend to contribute to the correct definition of the parameters of numerical modeling for accurate reproduction of experimental conditions, and greater approximation of the results obtained in the experiment, particularly in the separation layer limit. The equations based on fluid mechanics are solved in a computing platform, where's simulated a typical wind flow through the control volume that encloses the region in question, referring to a reduced model representative of Jaburu Hill, located in Vitória, state of Espírito Santo, Brazil. The analysis will be done by fluid dynamics simulation software ANSYS Fluent 13.0, from a computational model already defined. The analysis is done by fluid dynamics simulation software ANSYS Fluent 13.0, from a computational model already defined. The simulations are performed in the supercomputing center (CESUP) at UFRGS. After the simulations, are obtained data about velocity distribution over the terrain, and velocity profiles over ground, at points located on a vertical longitudinal plane of the simulated model. The results are compared with experimental and numerical information previously published. Important changes of the results in the region of separation of the boundary layer are observed.

**KEYWORDS:** (roughness height, wind flow, fluid mechanics, numerical simulation)

## ÍNDICE

	Pág.
1	INTRODUÇÃO .....1
2	OBJETIVOS.....2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....2
3.1	Energia Eólica .....2
3.2	Micro Posicionamento.....3
3.3	Camada Limite Atmosférica .....3
3.4	Rugosidade Superficial e Influência da Topografia .....5
3.5	Escoamentos Turbulentos.....6
3.6	Modelagem Matemática - Equações Fundamentais da Dinâmica dos Fluidos.....6
3.7	Dinâmica dos Fluidos Computacional .....7
3.8	O modelo de turbulência $k-w$ SST .....7
3.9	Método dos Volumes Finitos.....7
4	METODOLOGIA .....8
4.1	Descrição do problema.....8
4.1.1	Modelo Computacional.....9
4.1.2	Condições Iniciais e de Entrada.....10
4.1.3	Condições de Saída.....10
4.1.4	Condições de Parede.....11
4.1.5	Condições de solo.....11
4.2	Recursos Computacionais.....11
5	RESULTADOS.....11
6.	CONCLUSÕES.....14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....15
	Anexos .....16
	Apêndice I .....18
	Apêndice II.....20

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia cinética dos ventos para a realização de trabalho e a geração de energia elétrica é uma importante alternativa frente a outras fontes, devido ao seu baixo impacto socioambiental e à sua característica renovável [Atlas Eólico - RS, 2002]. Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhorias aerodinâmicas, estratégias de controle e operação das turbinas, etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos.

Visando a diversificação da matriz energética e aumento da oferta de energia elétrica, o governo brasileiro tem oferecido incentivos à energia eólica, como isenções tributárias. Além dos benefícios de tributação, o setor eólico passa por um ótimo momento de eficiência tecnológica, com a entrada de novos investidores no país, derrubando os preços para se firmar no mercado. Além disso, a fabricação em série cria uma economia de escala que ajuda a derrubar os preços dos equipamentos.

A avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalho sistemático de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. Geralmente, uma avaliação rigorosa requer levantamentos específicos, mas dados coletados em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica. Os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento (locais, regionais e nacionais) têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica no país [Aldabo, 2002]. À medida que a energia eólica se torna competitiva no mercado de energia, aumenta a importância da evolução e precisão dos métodos para o conhecimento do potencial eólico em um local, bem como a simulação do aproveitamento energético dos aerogeradores que serão posicionados neste local [Caldas, 2010].

No Brasil, os parques eólicos geralmente têm sido instalados em regiões planas, preferencialmente as áreas litorâneas. Conforme as regiões mais favoráveis disponíveis para instalação de parques eólicos vão sendo ocupadas, prevê-se que em um futuro próximo, parques eólicos devam ser instalados em locais de terrenos complexos e irregulares, conforme houver a escassez de locais com topografia plana e regular. Ainda, com o planejamento do crescimento de instalações de produção de energia elétrica distribuídas, ou seja, próximas às áreas de consumo, novos parques deverão ser implantados em terrenos mais complexos. Assim, é interessante que se busque novas alternativas de métodos de avaliação do potencial eólico neste tipo de relevo, visto que os métodos usuais utilizados atualmente apresentam deficiência, pois fazem uma simplificação das características do escoamento; priorizando a velocidade do vento e subestimando a turbulência presente no escoamento. Trabalhos recentes têm empregado a Dinâmica dos Fluidos Computacional como ferramenta de avaliação do potencial eólico em uma área de interesse para projetos eólicos. [Stangroom, 2004].

A dissertação desenvolvida anteriormente por reitas Filho, 2012, apresenta a comparação da análise numérica do escoamento sobre um terreno complexo com os resultados experimentais obtidos no Túnel de Vento Professor Joaquim Blesmann (LAC). Os resultados obtidos apresentaram boa concordância na maioria dos pontos estudados, contudo a região de separação da camada limite após a elevação apresentou maior discrepância com os dados experimentais. Nas conclusões, o autor sugere que esta divergência possa ter origem no parâmetro de rugosidade da superfície, de difícil determinação experimental.

Este trabalho apresenta um estudo da influência do parâmetro de rugosidade superficial para a análise do problema estudado na dissertação de Freitas Filho, 2012. Diferentes valores para a altura de rugosidade são utilizados para a simulação numérica por CFD, de um escoamento de vento através de um terreno de geometria complexa. São apresentados os perfis de velocidade em pontos pré-definidos, onde existem os dados experimentais e numéricos obtidos anteriormente, à montante e jusante do morro principal do modelo reduzido, em diferentes planos de altura. Estes são comparados com os resultados obtidos na dissertação e no experimento (LAC).



## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal é avaliar a influência do parâmetro de rugosidade nos resultados obtidos numericamente, principalmente na região de separação da Camada Limite. Também é apresentada a modelagem e metodologia de análise do comportamento de um escoamento de vento através de um terreno complexo utilizando CFD, para buscar resultados mais próximos aos obtidos no ensaio em túnel de vento, principalmente nos pontos onde houve maior divergência. Para isto serão realizadas novas simulações, utilizando a mesma modelagem definida na dissertação de referência, porém testando outros valores de rugosidade superficial. A qualidade da malha de volumes finitos foi previamente investigada no trabalho de Freitas Filho, 2012, sendo empregada nesta simulação a mesma discretização do trabalho citado. O modelo de turbulência adotado é definido conforme resultados da dissertação, que indicam o modelo k- $\omega$  SST como o mais adequado. Deseja-se encontrar um valor que sirva de referência para a rugosidade característica do modelo testado em túnel de vento, de preferência com maior aproximação do que o utilizado inicialmente no trabalho original, a fim de determinar o comprimento de rugosidade característico para o modelo em análise, possibilitando novos estudos e com isso contribuindo com o desenvolvimento do uso da energia eólica.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Energia Eólica

O vento (ar em movimento) origina-se da associação da radiação solar e da rotação planetária. Trata-se de um mecanismo solar planetário permanente, cuja duração é mensurável na escala de bilhões de anos, ou seja, o vento é renovável. O ar é composto de moléculas (nitrogênio, oxigênio e outros gases), portanto possui massa. Esta massa em movimento resulta em uma energia cinética gerada, ou seja, o vento é energia. [Atlas Eólico – RS, 2002].

Denomina-se energia eólica, a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia mecânica de rotação de um eixo, com o emprego de turbinas eólicas. [Aldabo, 2002]. Uma turbina eólica é uma máquina que converte parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, convertendo em potência mecânica de eixo (torque x rotação), a qual é convertida em potência elétrica (tensão x corrente) através de um gerador elétrico. Ela pode converter a energia cinética somente do ar que passa através da área interceptada pelas pás rotativas, conforme a equação 3.1 abaixo:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A_r \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta \quad [W] \quad (3.1)$$

Onde  $P$  é a potência disponível (W),  $\rho$  é a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A_r$  é a área do rotor ( $\text{m}^2$ ),  $v$  é a velocidade média do vento (m/s) e  $C_p$  o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor (valor máximo teórico = 0,593, na prática atinge 0,45 e é variável com o vento, rotação e parâmetros de controle da turbina) e por fim,  $\eta$  é a eficiência do conjunto gerador (transmissões mecânicas e elétricas).

Porém, o potencial eólico de uma dada região independe das características das turbinas, podendo ser apresentado na forma de densidade de potência disponível por área varrida ( $\text{W/m}^2$ ), conforme mostrado na figura 3.1 a seguir:

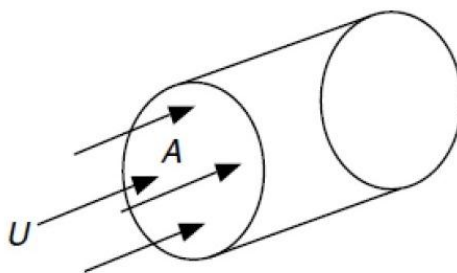


Figura 3.1 – Fluxo de ar através de uma área A com velocidade U [Manwell et al., 2009]

A partir da equação da continuidade aplicada ao volume de controle acima, chega-se que a potência do vento disponível que atravessa uma seção de área A, é dada por:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (3.2)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar, e U o módulo de sua velocidade.

A partir da equação 3.2, observa-se que a potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade. Esta variação da energia com a velocidade do vento mostra a importância na obtenção dos dados do vento, e a correta previsão da distribuição da velocidade no ponto de instalação de uma turbina eólica, para avaliação da energia disponível.

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m<sup>2</sup> a uma altura de 50 metros, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. Na tabela do anexo 3.1, são apresentados alguns valores de potência disponível em função da velocidade do vento.

### 3.2. Micro Posicionamento

Micro posicionamento é definido como o processo utilizado para determinar o melhor posicionamento de uma ou mais turbinas eólicas em um terreno. O objetivo é encontrar a melhor posição das turbinas buscando maximizar a captação da energia. Para isto, são necessárias informações detalhadas do comportamento do vento no local de instalação [Manwell et al., 2009].

Estudos recentes desenvolvidos mostram a eficiência do uso de CFD para análise dos efeitos gerados por um escoamento de vento sobre terrenos irregulares e de geometria complexa. Os resultados experimentais foram comparados com os valores numéricos gerados na simulação, representando satisfatoriamente na maioria dos casos, os efeitos gerados pela turbulência e rugosidade característica do terreno [Xiao et al., 2010].

Os métodos mais empregados atualmente apresentam uma deficiência, sob o ponto de vista de precisão, pois as características do escoamento são simplificadas, devido aos modelos serem baseados no conceito de escoamento linearizado, que tende a subestimar a turbulência e superestimar a velocidade do vento, a fim de uma rápida análise do fluxo do vento. Logo, o micrositing se torna um assunto desafiador e modelos que utilizam a dinâmica dos fluidos podem ser úteis para aprimorar a aplicação dos métodos tradicionais como Wasp. [Monnich e Pacheco, 2009].

### 3.3. Camada Limite Atmosférica

A aceleração, ou variação na quantidade de movimento, experimentada pelas parcelas de ar atmosférico, é decorrente da resultante vetorial de todas as forças atuantes sobre elas (segunda lei de Newton). Os gradientes de pressão existentes na atmosfera constituem a principal força motriz dos movimentos de ar. Adicionalmente, parcelas de fluido em movimento

sofrem a ação de fricções internas que resistem à tendência do escoamento (forças viscosas resistivas ou atrito). A maneira mais satisfatória de incluir os efeitos da aceleração das coordenadas devido ao movimento de rotação da Terra é a introdução de "forças aparentes", onde incluem-se a força de Coriolis e a força centrífuga, devido à rotação da terra. Em resumo, o vento surge basicamente pela ação da força do gradiente de pressão originado pelo aquecimento diferencial da superfície terrestre e do ar atmosférico pela radiação solar. Apenas após iniciado o movimento, as forças de atrito e de Coriolis passam a atuar, mas somente para modificar o movimento, e não para produzi-lo. O vento é controlado pela combinação dessas forças. A atmosfera da Terra é comumente dividida em camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera e exosfera. Destas camadas, a troposfera é a que se encontra mais próxima à superfície. Nos níveis atmosféricos mais baixos, o relevo e a presença de obstáculos moldam o escoamento do ar sobre a superfície terrestre, bem como geram turbulências no escoamento das massas de ar.

A *Camada Limite Atmosférica* é definida como a parte da troposfera que sofre influência direta da superfície, podendo ser considerada como uma fina camada adjacente à superfície da Terra em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera. As alterações na superfície do terreno, tais como rugosidade e temperatura, afetam diretamente a CLA. A influência da superfície é especialmente dominante na chamada camada superficial, compreendendo os primeiros 50 a 100 metros da atmosfera, onde ocorrem os intercâmbios de momento, calor e umidade entre a superfície e o ar atmosférico. A rugosidade da superfície ocasiona a redução da velocidade do ar e, portanto, da intensidade da força de Coriolis, já que esta é proporcional ao módulo da velocidade [G.A.A., Moreira, 2007]

Além do comportamento turbulento devido às interações superfície-atmosfera, outro aspecto importante a ser considerado é o cisalhamento do vento. A velocidade do vento é nula a alturas próximas à superfície e aproximadamente geostrófica na atmosfera livre. Na camada superficial observa-se um perfil de velocidade vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento, como apresentado na figura 3.2, onde  $z_0$  é a rugosidade superficial.

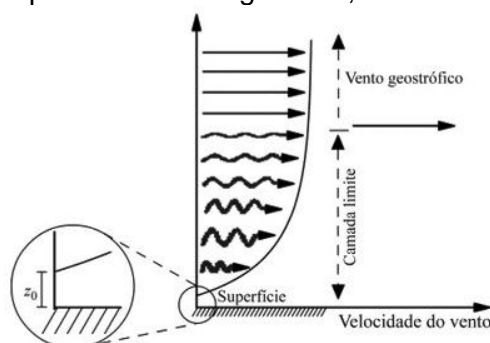


Figura 3.2 – Perfil vertical da velocidade do vento da superfície até a altura do vento geostrófico (fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.30, n°1 2008)

Simulações da camada limite sobre uma topografia são baseadas em considerações da região interna da camada limite, a qual alcança uma altura máxima de algumas centenas de metros de altura. A região é suficientemente próxima à superfície e totalmente turbulenta, e assim os efeitos da força de Coriolis e empuxo devido à estratificação podem ser negligenciados [Stangroom, 2004].

A lei de potência para o perfil de velocidade é uma equação que representa em escala logarítmica uma reta de declividade  $p$ , que descreve bem a CLA, com exceção na região próxima a superfície [Loredou-Souza *et.al*, 2004]. O perfil em lei de potência é expresso por:

$$\frac{U}{U(z_{ref})} = \left( \frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (3.3)$$

O valor do expoente  $p$  caracteriza o tipo de terreno, podendo variar de 0,11, para superfícies lisas, até 0,34, para cidades com grande densidade de prédios altos. De acordo com Loredou-Souza *et. al.* [2004], esta lei é amplamente utilizada, porém apresenta alguns problemas em sua aplicação. Como a equação é válida para qualquer valor de  $(z-z_d)$ , positivo ou nulo, não identifica o topo da CLA, então a velocidade do vento aumenta indefinidamente. O modelo não apresenta uma justificativa teórica, mas representa consideravelmente o perfil médio de velocidades. A lei logarítmica para o perfil de velocidade desenvolvida no começo do século 20, introduzida ao conceito meteorológico por Prandtl em 1932, afirma que o perfil vertical médio de velocidade varia logaritmicamente na subcamada dinâmica [Stangroom, 2004]. A equação padrão do perfil logarítmico de velocidade, usada para descrever o escoamento sobre superfícies rugosas, é dada por:

$$V(z) = V^*/k \cdot \ln(Z/Z_0) \quad (3.4)$$

Onde a variação da velocidade com a altura vertical  $z$ , é dada em função da velocidade de fricção ( $V^*$ ), da constante de von Karmán ( $k$ ), e do comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ). O comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero, e depende do relevo e obstáculos da superfície. A partir da equação 3.4, igualando duas camadas limites em uma mesma reta de alturas, obtém-se:

$$V(z) = V_{ref} \cdot [ \ln(Z/Z_0) / \ln(Z_{ref}/Z_0) ] \quad (3.5)$$

Através dessa manipulação algébrica, tem-se que a equação 3.5, define a velocidade do vento numa altura qualquer ( $Z$ ), a partir de uma velocidade de referência ( $V_{ref}$ ), medida a uma altura ( $h_{ref}$ ), e ( $Z_0$ ) é a rugosidade do terreno. Esta equação permite a determinação analítica da velocidade do vento em qualquer altura, a partir de uma medida de referência que pode ser medida em campo. Também apresenta a vantagem de não ser necessário o conhecimento da velocidade de fricção ( $V^*$ ) e nem da constante de Karman ( $k$ ); basta conhecer a rugosidade do terreno no ponto e obter dados de medição feitos em uma altura de referência. A equação 3.5 é uma aproximação da camada limite atmosférica real, visto que o perfil real de velocidades na vertical depende também da estratificação de temperatura e pressão na atmosfera. Esta equação deve ser utilizada para regiões com altura inferior a 150 metros.

### 3.4. Rugosidade Superficial e Influência da Topografia

A CLA é diretamente afetada pela superfície dos terrenos. A rugosidade superficial é definida como a propriedade física que descreve a ação da superfície terrestre na redução do momento e na absorção do impacto dos ventos. Para uma determinada área, a rugosidade superficial é estimada conforme os elementos de rugosidade contidos nela, como árvores, morros, rios, vales, prédios, etc. Embora seus efeitos nos perfis de velocidade média e temperatura sejam bem conhecidos, existe uma dificuldade em identificar uma escala de comprimento que caracterize a rugosidade superficial. [Antonia e Krogstad, 1999].

De acordo com a norma NBR-6123, a superfície de um terreno pode ser caracterizada quanto à rugosidade em cinco categorias:

Categoria I – Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Para esta categoria o comprimento de rugosidade  $Z_0$  vale 0,005 metros. Ex: mar calmo, lagos, rios, pântanos sem vegetação.

Categoria II – terrenos abertos em nível, ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1 metro e o comprimento de rugosidade  $Z_0$  vale 0,07 metros. Ex: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias, fazendas sem sebes ou muros.

Categoria III – terrenos planos ou ondulados com obstáculos tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3 metros e o comprimento de rugosidade  $Z_0$  vale 0,3 metros. Ex: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a consideráveis distâncias do centro, com casas baixas.

Categoria IV - terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 metros e o comprimento de rugosidade  $Z_0$  vale 1 metro. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não podem ser consideradas na categoria V.

Categoria V – terrenos cobertos por obstáculos grandes, numerosos, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 metros e o comprimento de rugosidade  $Z_0$  vale 2,5 metros. Ex: florestas com árvores altas ou copas isoladas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos.

Para o presente estudo, serão utilizados os dados apresentados, conforme as interpretações mais adequadas para as classes de terreno informadas. A forma da topografia é outro fator que pode causar consequências no escoamento até maiores do que o efeito da rugosidade superficial. Em terrenos complexos, ocorre o aumento da velocidade devido à aproximação das linhas de corrente. Assim o fluxo continua ao longo dessas camadas, com mais velocidade. Após os obstáculos, há o afastamento das linhas e o fluxo desacelera [D.G.R. Freitas Filho, 2012]. As mudanças de elevação da superfície podem provocar alterações no campo de pressão na região do morro, afetando ainda mais o escoamento local [Stangroom, 2004].

### 3.5. Escoamentos Turbulentos

Ao longo dos anos, foram introduzidos alguns conceitos para definir a turbulência. Através do experimento realizado por Osborne Reynolds em 1883, que injetou um corante em um duto transparente com fluxo de água, foi possível observar diferentes tipos de escoamento. Com o aumento da velocidade do escoamento, observaram-se grandes oscilações causando uma mistura completa do corante com a água. Este fenômeno foi chamado de turbulência [Moller e Sivestrini, 2004]. A turbulência caracteriza-se principalmente pela irregularidade do escoamento, alta difusividade, altos números de Reynolds, e tridimensionalidade. O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas em um escoamento. Através deste parâmetro, é possível caracterizar se o regime de escoamento de um fluido é laminar ou turbulento [Fox e McDonald, 2006].

Um fluido se movendo a altos números de Reynolds sobre uma superfície pode produzir uma camada limite turbulenta. Neste caso, o efeito do atrito viscoso sobre o corpo aumenta. Em escoamentos atmosféricos, normalmente têm-se regimes turbulentos próximos à superfície devido às irregularidades da topografia.

### 3.6. Modelagem Matemática

A solução do sistema de equações originadas da modelagem matemática, baseadas nas leis da conservação de massa, energia e quantidade de movimento, que fundamentam a mecânica dos fluidos, é exata apenas para alguns casos quando o escoamento é laminar. A modelagem a partir da solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS – Reynolds Avaraged Navier-Stokes equations) é a alternativa mais utilizada para resolução de problemas de escoamentos turbulentos em engenharia. [Petry,2002]. Este método envolve a utilização de um modelo de turbulência coerente ao comportamento do escoamento. Para este trabalho, o modelo  $k-\omega$  SST foi verificado previamente na dissertação de Freitas Filho, 2012, como o mais adequado para esta aplicação, quando comparado com os modelos  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ . A partir do emprego de métodos numéricos, obtém-se a solução das

equações de conservação para escoamentos laminares e turbulentos. A partir da solução das equações diferenciais de conservação de massa e quantidade de movimento, é possível analisar a dinâmica dos fluidos. As equações governantes para escoamento de fluidos podem ser aplicadas em escoamentos atmosféricos e experimentos em túnel de vento. Para o caso de escoamentos turbulentos, a equação do balanço da quantidade de movimento pode ser descrita da seguinte maneira [Freitas Filho, D.G.R., 2012]:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3.7)$$

Os termos à esquerda da equação acima se referem ao transporte do fluido, e os à direita se referem à pressão e tensões viscosas. Outra equação importante é a da conservação de massa em um volume de controle:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3.8)$$

Para escoamentos incompressíveis, a Equação (3.8) pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.9)$$

### 3.7. Dinâmica dos Fluidos Computacional - Simulação Numérica

A análise numérica é baseada no método dos Volumes Finitos e nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), onde as mesmas são avaliadas considerando intervalos de tempo suficientemente grandes para o estudo da turbulência. [Küchle, 2010]. Introduzem-se modelos para representar os efeitos totais da turbulência no escoamento. [Petry, 2002]. A principal razão para esta escolha é o menor tempo de processamento, fundamental em problemas de grandes dimensões, pelo elevado número de equações a serem resolvidas. O critério de convergência adotado é  $1E-5$ , razoável para este tipo de problema. O modelo de turbulência  $k-\omega$  SST é adotado para o problema. Utiliza-se uma simulação em regime permanente, sem transferência de calor e também se considera o escoamento incompressível.

### 3.8. Modelo de Turbulência $k-\omega$ SST

Os modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  apresentam algumas falhas em aplicações específicas. O  $k-\varepsilon$  apresenta falhas em camadas limites turbulentas com separação de escoamento, e o  $k-\omega$ , embora seja mais preciso em regiões mais próximas à parede, também apresenta falhas em escoamentos com separação. Devido à necessidade de melhoramento nos cálculos de modelos aeronáuticos com gradientes adversos de pressão e separação da camada limite, nasceu o modelo  $k-\omega$  SST que é uma mescla entre os modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ , onde  $k$  representa a energia cinética turbulenta, e  $\omega$  representa a frequência de turbulência. [Menter et al., 2003].

### 3.9. Método dos Volumes Finitos

Emprega-se a idéia geral de substituir o domínio contínuo das equações diferenciais por um volume discreto. Assim, o valor da variável em análise não é obtido continuamente em todo o domínio, e sim em certos pontos, ou volumes discretos. Para integrá-los, é necessário adotar funções de interpolação entre eles. Obtém-se uma equação algébrica aproximada para cada ponto ou volume, restando resolver o sistema de equações resultantes. O método tem como

objetivo solucionar as equações de conservação e quantidade de movimento na forma diferencial, substituindo-as por expressões algébricas, resolvidas iterativamente. Isso ocorre devido à substituição de diferenças infinitesimais por diferenças finitas entre as variáveis (pressão e velocidade). Os valores das variáveis calculados são atribuídos aos centroides de cada volume. Desta forma, a solução será discreta, em função do número de volumes elementares presentes no domínio de cálculo. [Maliska, 2004].

#### 4. METODOLOGIA

Os resultados desejados são obtidos através de simulação numérica realizada no software comercial Ansys Fluent, v13.0, que se baseia no método de discretização por Volumes Finitos e integração das equações de conservação que descrevem o escoamento. Para a correta análise através da simulação numérica a ser realizada, alguns fatores importantes precisam ser definidos; método de simulação, modelagem do terreno, definição do volume de controle, levantamento de dados das condições iniciais e condições de contorno através das etapas descritas a seguir.

##### 4.1. – Descrição do problema

Busca-se conhecer a rugosidade superficial característica de um determinado terreno real; no qual o comportamento do vento e os perfis de velocidade gerados, foram verificados através de um ensaio no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (mostrado no anexo 4.1) no Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, da UFRGS, com um modelo reduzido do terreno. O túnel de vento referido foi projetado para ensaios estáticos e dinâmicos de construções civis. Quando não há modelos instalados no interior do túnel, o escoamento pode alcançar velocidades de até 45 m/s. O ventilador é acionado por um motor de 100 HP e um inversor de frequência.

O perfil vertical de velocidades médias do vento simulado foi empregado respeitando a lei de potência, expressa pela equação 3.3. De acordo com a NBR-6123 [1988], os terrenos podem ser classificados em categorias de acordo com o seu tipo e as suas características. Estas características estão diretamente relacionadas com o expoente  $p$  do perfil potencial de velocidades médias. Os dados utilizados no experimento possuem o valor do expoente  $p=0,23$  que representa terrenos entre as categorias III e IV da norma.

O modelo foi elaborado a partir das curvas de nível do morro do Jaburu, localizado no município de Vitória, no Estado do Espírito Santo. As medições foram realizadas no modelo reduzido do morro sobre o piso do túnel de vento, conforme mostrado na figura 4.1 a seguir. As medições da velocidade sobre os pontos de interesse foram obtidos com o uso de um anemômetro de fio quente, o qual se baseia nas trocas de calor entre o sensor e o fluido, e assim relacionando-as com a velocidade do fluido [Möller, 2003]. Foram definidos nove pontos de medição onde foram verificadas a velocidade e a turbulência em 20 alturas diferentes. Estes pontos podem ser observados em escala real na seção do morro ilustrada no anexo 4.2. A análise deste trabalho terá como foco os pontos 7,8 e 9, que se encontram na região de esteira à jusante do morro principal, e onde houve maior divergência nas simulações já realizadas.



Figura 4.1 – Modelo reduzido do Morro do Jaburu, no ensaio no Túnel de Vento [LAC,2010]

No anexo 4.3, são mostradas as coordenadas de cada ponto para o modelo reduzido. Para análise dos perfis de velocidade, elas foram normalizadas em função de uma velocidade de referência equivalente à altura  $Z=0,45$  metros acima da superfície, para cada ponto sobre a superfície. As velocidades normalizadas são obtidas através da razão entre a velocidade medida e a velocidade de referência. A cota  $Z$  representa a altura em metros sobre o modelo. [LAC,2010]. Na tabela 4.2 em anexo, encontram-se os dados das velocidades normalizadas sobre os pontos de interesse, considerando o perfil de velocidade do vento na entrada com expoente  $p = 0,23$ . As dimensões cartesianas do volume de controle das curvas de nível do Morro do Jaburu em escala real são as seguintes: 1880 metros de comprimento, 1312 metros de largura por 193 metros de altura. Para evitar que as condições de entrada e saída possam influenciar no resultado das simulações, aumentou-se o comprimento de domínio. Assim a entrada e a saída do domínio foram deslocada em 200 e 940 metros respectivamente. Assim, o novo comprimento do domínio passou a ter 3020 metros, conforme mostrado no anexo 4.5. Após esta modelagem, o modelo foi escalonado para escala reduzida conforme modelo físico simulado, mostrado na figura 4.1

#### 4.1.1 – Modelo Computacional

O modelo computacional foi previamente construído para as simulações da referida dissertação, e fornecido para a realização dos estudos deste trabalho. A partir da representação das curvas de nível do terreno no software comercial AutoCAD 2012, obteve-se as coordenadas dos pontos necessários para a geração da superfície. Após a obtenção dos pontos, suas coordenadas foram inseridas no software gratuito Topocal 2.0, utilizado para cálculos topográficos e modelagem de terrenos. A escala foi reduzida para conformidade com o modelo testado em túnel de vento. As dimensões do domínio computacional utilizado para as simulações são 2,99 metros de comprimento, 1,3 metros de largura e 0,9 metros de altura.

A discretização do domínio foi realizada utilizando o software comercial ANSYS-ICEM 13.0, para geração da malha utilizada nas simulações. A malha gerada referente ao domínio do modelo computacional é apresentada na figura 4.2 a seguir. Foram adotados volumes finitos hexaédricos, com refinamento do tamanho próximo a superfície do morro. Na dissertação de Freitas Filho, 2012, foi avaliada a qualidade da malha comparando malhas com variação no número de volumes de cada uma. A qualidade foi avaliada analisando a vazão mássica através da saída do domínio, e comparando a variação desta propriedade entre as malhas. A malha 5



com maior refinamento, dividida em 2.497.500 volumes, teve desempenho satisfatório na convergência do parâmetro analisado, e assim foi a malha adotada.

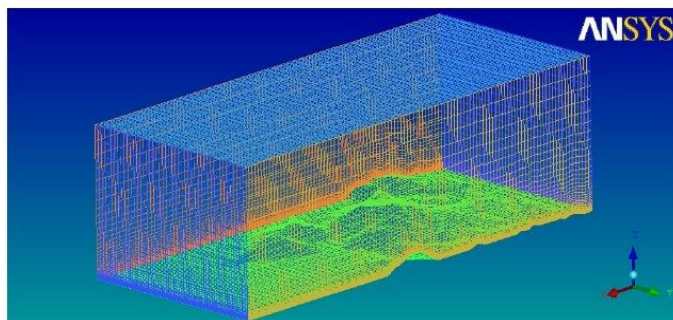


Figura 4.2 – Malha gerada sobre a superfície e domínio computacional discretizado.

#### 4.1.2 – Condições iniciais e de Entrada

A entrada do domínio é descrita por um perfil de velocidades que representa a CLA. Na saída do domínio considera-se fluxo livre e as laterais e os planos inferior e superior consideram-se paredes impermeáveis sem deslizamento. A figura 4.3 ilustra as condições de iniciais e de contorno do problema [Freitas Filho, D.G.R., 2012].

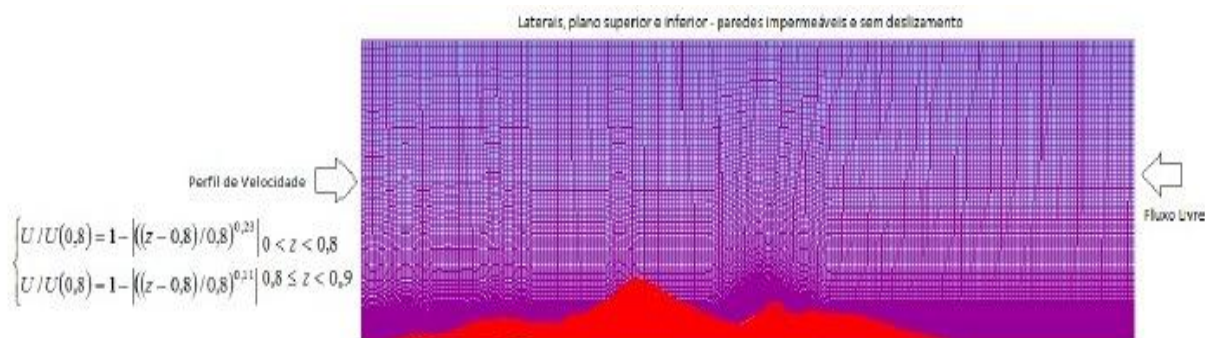


Figura 4.3 – Condições iniciais e de contorno do domínio computacional para as simulações

Para reproduzir o escoamento simulado no túnel de vento, foi elaborada uma função para representar um perfil de velocidades com as mesmas características do ensaio experimental. Nas direções  $y$  e  $z$  as velocidades são nulas. Na direção  $x$ , insere-se uma UDF (User-Defined Function) para simular um perfil de vento com a velocidade variável com a altura do domínio. Uma função UDF, é uma função programável que pode ser carregada dinamicamente com o ANSYS-Fluent 13.0.

O perfil de velocidades tem funções distintas para  $0 < z < 0,8$  e  $0,8 \leq z < 0,9$ . A mudança no valor do expoente  $p$  para cada região se deve ao fato que apenas a parte inferior do túnel simula a CLA através da utilização de elementos de rugosidade [Loredo-Souza et al., 2004]. Para o tratamento da turbulência, foram considerados a intensidade de turbulência e o diâmetro hidráulico. O diâmetro hidráulico é uma relação empírica que pode ser empregada no cálculo em dutos de seção transversal não circular [Fox e McDonald, 2006]. Para este estudo, foi utilizado o valor de 1,06 metros, parâmetro que caracteriza a seção do túnel, conforme suas dimensões. A intensidade de turbulência considerada foi de 10%.

#### 4.1.3 – Condições de saída

Como condição de saída do túnel de vento, adota-se a opção de fluxo livre (outflow) no ANSYS-Fluent 13.0. Utiliza-se esta opção quando na saída do domínio as informações sobre velocidade e pressão não são conhecidas inicialmente [Freitas Filho, D.G.R., 2012].

#### 4.1.4 – Condições de parede

Para a representação das laterais e do teto do túnel de vento, adota-se a opção de parede (wall) no Fluent, onde é possível selecionar as características da parede como rugosidade e deslizamento. Para as paredes do túnel, foi imposta uma condição de não deslizamento e rugosidade prescrita estipulada para a madeira, material das paredes internas do túnel. O valor da rugosidade para madeira é de 0,009 metros [Fox e McDonald,2006].

#### 4.1.5 – Condições de solo

Para as características na região de superfície, é escolhida condição de parede (wall) para o solo, inicialmente com rugosidade igual a 0,005 metros na dissertação referida, representando a espessura das camadas de construção utilizadas no modelo reduzido. Este valor caracteriza terrenos do tipo I da descrição citada na norma NBR6123, terrenos lisos de grande dimensão, como mar calmo, lagos, rios e pântanos sem vegetação. Neste estudo, serão testados novos valores de rugosidade variando de 0,003 a 0,3 metros, correspondendo às categorias de terreno I a III da NBR-6123.

#### 4.2. – Recursos Computacionais

A computação de alto desempenho baseia-se no conceito de agrupamento, onde vários processadores, conectados através de diversos meios de computação físicos e lógicos, operam em conjunto, como se fosse uma única máquina. Esta técnica diminui consideravelmente os tempos de processamento, permitindo tratar de problemas em escalas maiores, o que não seria possível pelos métodos da computação convencional.

As simulações foram realizadas com apoio do Cesup (Centro Nacional de Supercomputação) da UFRGS, que oferece esses recursos desde 1992. O Cesup atualmente dispõe de um cluster Sun Fire, com performance teórica de 12,94 Tflops; e um cluster SGI Altix, alcançando 7,07 Tflops. O cluster Sun Fire (Newton) onde são realizadas as simulações, possui 45 nós de processamento, sendo 3 nós de gerência. Também possui 8 GPUs nVIDIA Tesla, 1 GPU AMD FireStream, 1 switch Voltaire InfiniBand, total de 1296 GB de Memória RAM, total de 188 TB de capacidade de armazenamento, sendo 158 TB compartilhados com o cluster SGI Altix Gauss [Lovatto, 2010].

### 5. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados para cada caso simulado, conforme os parâmetros descritos no capítulo anterior. No primeiro caso, foi simulado o escoamento sobre o terreno, considerando o comprimento de rugosidade do mesmo igual a 0,003 metros, a fim de caracterizar um valor intermediário para terrenos de classe 1, conforme dados tabelados. No segundo caso, foi considerado um comprimento de rugosidade igual a 0,007 metros, valor próximo ao utilizado na dissertação de Freitas Filho, 2012. Já no terceiro caso, foi utilizado comprimento de rugosidade igual a 0,3 metros, o que caracteriza um terreno da categoria III da NBR 6123. As figuras 5.1, 5.2 e 5.3, ilustram o campo de velocidades na diretriz principal do terreno, representada pela seção A-A do anexo 4.2. Nestas figuras, se pode observar um aumento de velocidade na região dos pontos 1 e 2, no topo do morro, devido à aproximação das linhas de corrente. Já nos pontos 7,8 e 9, à jusante do morro, a velocidade diminui devido à mudança de direção da superfície, caracterizando um ponto de descolamento da camada limite, com recirculação, devido ao gradiente de pressão adverso.

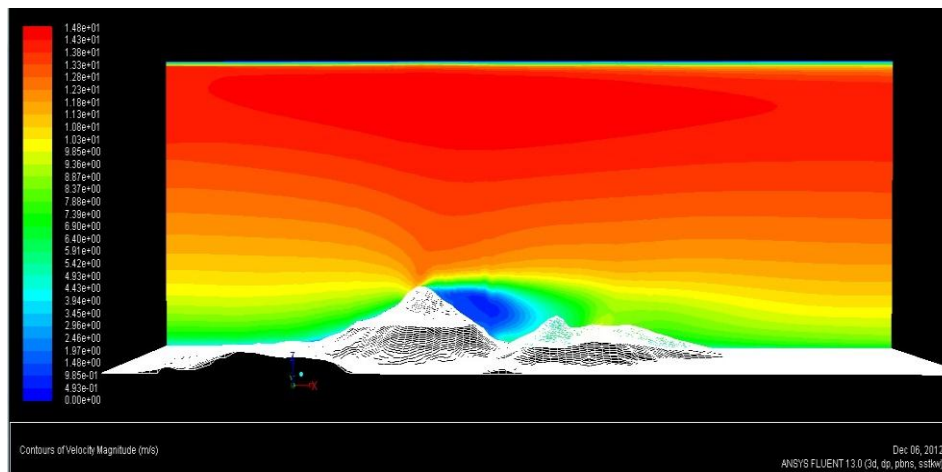


Figura 5.1 – Campo de Velocidade sobre o terreno na diretriz principal A-A, para o caso 1.

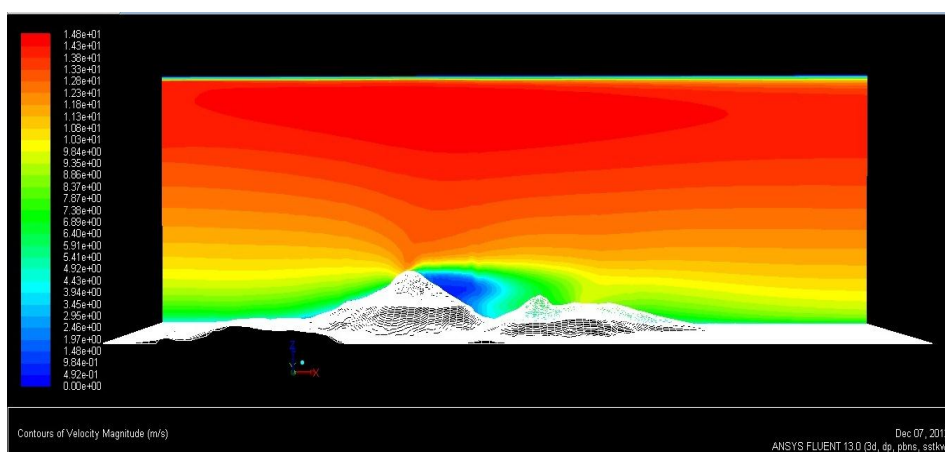


Figura 5.2 – Campo de Velocidade sobre o terreno na diretriz principal A-A, para o caso 2.

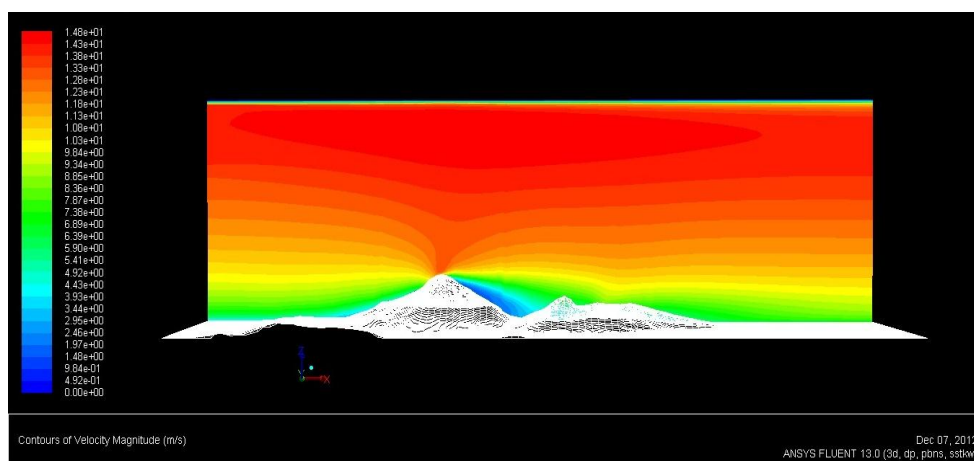


Figura 5.3 – Campo de Velocidade sobre o terreno na diretriz principal A-A, para o caso 3.

Nas figuras apresentadas, observa-se uma variação da intensidade da turbulência na região atrás do morro, para cada valor de rugosidade. O caso 1, que considera o menor valor de rugosidade, facilita o escoamento, porém ocorre o descolamento da camada limite mais rapidamente, apresentando uma região de turbulência maior. Para o caso 3, é possível perceber que mais rapidamente o vento à jusante do morro retorna ao seu comportamento regular, fato que permite a instalação de mais turbinas em um espaço menor. Para uma melhor observação, são mostrados nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, os vetores de velocidade à jusante do

morro no plano longitudinal principal do morro, indicado pela seção A-A, do anexo 4.2. Este é o plano vertical onde estão contidos os pontos de medição sobre o terreno. Nos casos 1 e 2, os perfis de velocidades indicam que há uma região de recirculação atrás do morro, com deslocamento da camada limite. Já no caso 3, ocorre apenas a diminuição da velocidade, porém a direção do escoamento segue acompanhando a superfície do morro.

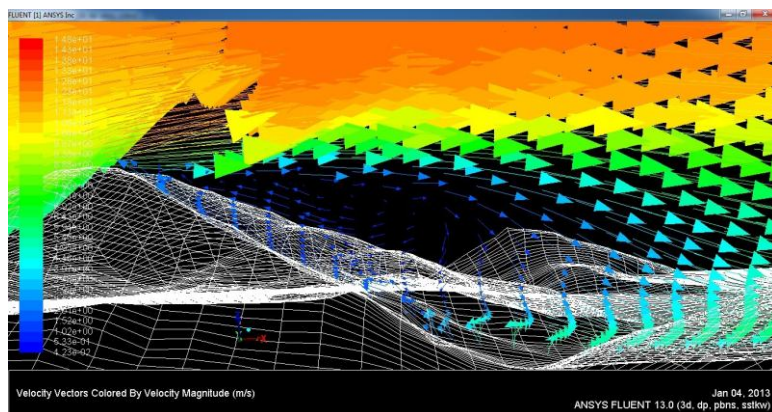


Figura 5.4 – Perfis de Velocidade á jusante do morro na diretriz principal A-A, para o caso 1.

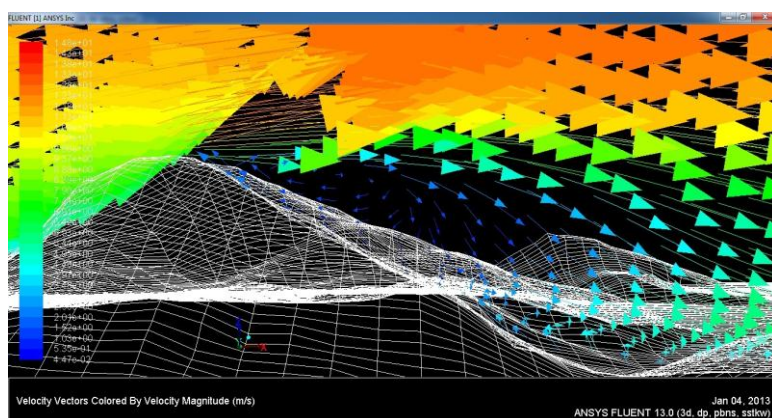


Figura 5.5 – Perfis de Velocidade á jusante do morro na diretriz principal A-A, para o caso 2.

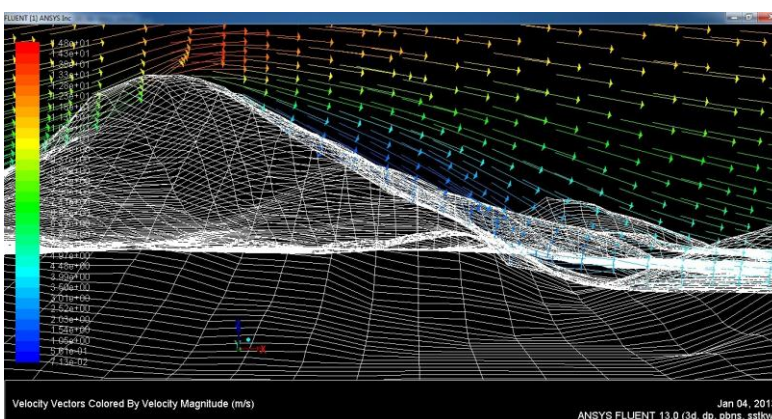


Figura 5.6 – Perfis de Velocidade á jusante do morro na diretriz principal A-A, para o caso 3.

Nos Apêndices 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4, estão apresentados os gráficos comparativos entre os perfis de velocidade obtidos no trabalho para os pontos 1, 7, 8 e 9; e os dados obtidos experimentalmente e na dissertação de mestrado. Pela análise comparativa destes perfis, observa-se que nos pontos 7 e 8, a velocidade média foi maior para o caso 3, em alturas entre 0 e 150 mm, a partir da superfície. Isto pode ser explicado pelo fato de a maior rugosidade

testada ter reduzido a velocidade à montante, não causando recirculação neste ponto e mantendo o escoamento unidirecional para este caso. Porém este resultado se afastou dos valores experimentais e numéricos dos outros casos. No ponto 9, percebe-se o aumento da velocidade média para os casos 2 e 3, até a altura aproximada de 100mm, comportamento também ocorrido no teste em túnel de vento, e diferente dos resultados numéricos da dissertação e do caso 1 deste trabalho. Porém, os valores obtidos nos casos 2 e 3 são superestimados em relação aos resultados experimentais. Nos apêndices 2.1, 2.2 e 2.3, são apresentados os perfis de velocidade nos pontos 1 a 9 sobre o terreno.

Na tabela do anexo 5.1, e na figura 5.10, são apresentadas as comparações das diferenças relativas entre cada caso simulado e o valor experimental obtido.

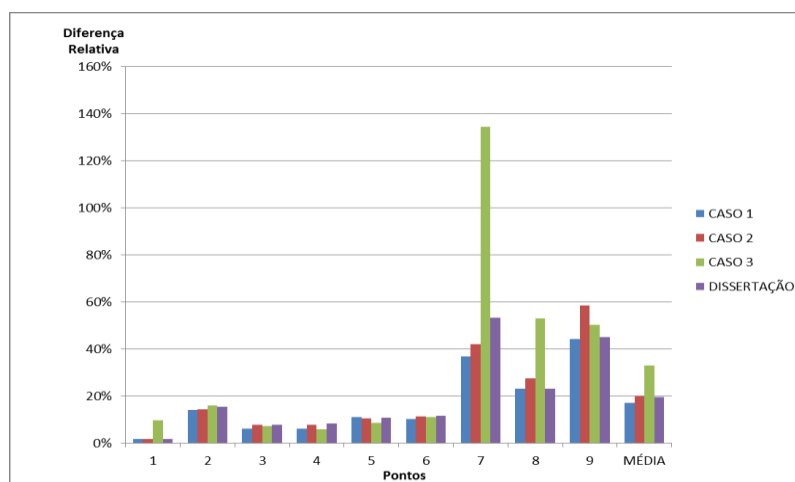


Fig.5.10 – Gráfico da diferença relativa entre os casos avaliados para cada ponto

O caso 1, com altura de rugosidade equivalente a 0,003 metros, é o que mais se aproxima dos resultados experimentais e numéricos contidos na dissertação, sugerindo que valores mais baixos de altura de rugosidade, como 0,003 metros ou menos, possam caracterizar melhor o modelo físico testado. Estes valores são tipicamente utilizados na representação de terrenos planos, ou de grandes dimensões e com pequena inclinação ou irregularidades, regiões litorâneas de grande extensão, mares, lagos e oceanos.

## 6. CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos no capítulo 5, conclui-se que a rugosidade é um parâmetro de importante influência em um escoamento no interior da camada limite atmosférica. As principais diferenças apresentadas nos resultados entre os casos simulados são na região de gradiente de pressão adverso, atrás do morro principal do modelo. Nos casos onde a altura de rugosidade considerada para o terreno é menor, a região de recirculação e descolamento da camada limite se estendeu por um espaço maior. Esta característica geralmente não é favorável à implantação de um parque eólico, visto que para a instalação de diversas turbinas em sequência, estas devem se encontrar em zonas onde o escoamento do vento é regular. Zonas de grande turbulência e recirculação acabam reduzindo o aproveitamento da conversão da energia, além de causar esforços excessivos e não controlados sobre as peças do equipamento, podendo danificá-lo. Também é possível verificar através das tabelas comparativas, que a altura de rugosidade utilizada na simulação do caso 1, fornece resultados mais próximos aos valores experimentais como um todo, apresentando pequena melhora em relação ao caso simulado na dissertação de Freitas Filho, 2012. Enquanto no caso simulado na dissertação, com altura de rugosidade igual a 0,005 metros, a média das diferenças relativas para os pontos foi de aproximadamente 19%, o caso 1 deste trabalho que considera a altura de rugosidade do terreno igual a 0,003 metros, apresenta uma diferença relativa de aproximadamente 17%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antonia, R. A.; Krogstad, P.-A. Surface roughness effects in turbulent boundary layers. **Experiments in Fluids**. Vol.27, P. 450-460, 1999.

Camargo, O.A. et. Al – SEMC. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**, agosto 2002.

Freitas Filho, D.G.R.; Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para avaliação do potencial eólico em terrenos complexos. **PROMEC – UFRGS**, 2012.

Fox, R.W.; McDonald, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, RJ, 2006.

Küchle, J.; **Emprego da Dinâmica dos Fluidos Computacional na análise do potencial eólico de uma microrregião em Laguna**. UFRGS, 2010.

LAC, Laboratório de Aerodinâmica das Construções. **Relatório Interno de Medições do morro do Jaburu em Vitória – ES**. UFRGS, Porto Alegre, 2010.

Loredo-Souza, A. M.; Schettini, E. B. C.; Paluch, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. **Turbulência Vol 4**. Rio de Janeiro: ABCM, 2004. P.137-163.

Lovatto, M. L.; **Produtos ANSYS no Cesup – Submissão de processos via SGE**. Ed. 2 - janeiro 2010.

Maliska, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L. **Wind Energy Explained**. Wiley, Noida – Índia, 2009.

Menter, F. R.; Kuntz, M.; Langtry, R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. **Turbulence, Heat and Mass Transfer 4**, 2003.

Möller, S. V.; Experimentação em turbulência. In: SILVEIRA NETO, A.; MANSUR, S. S.. **Turbulência Vol 2**. Rio de Janeiro: ABCM, 2003. Cap. 4, p 203-244.

Mönnich, K.; Pacheco, A. Brasil: Implementando um campo de teste para verificação de modelo CFD. **DEWI MAGAZIN N.35**, p. 18-21, 2009.

Moreira, G.A.A; **Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica com Validação Experimental**. UFMG – Minas Gerais, 2007.

NBR-6123 – **Forças Devidas ao Vento em edificações** – ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

Petry, A. P.; **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. UFRGS, 2002.

Stangroom, P.; **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**. Nottingham – UK, 2004.

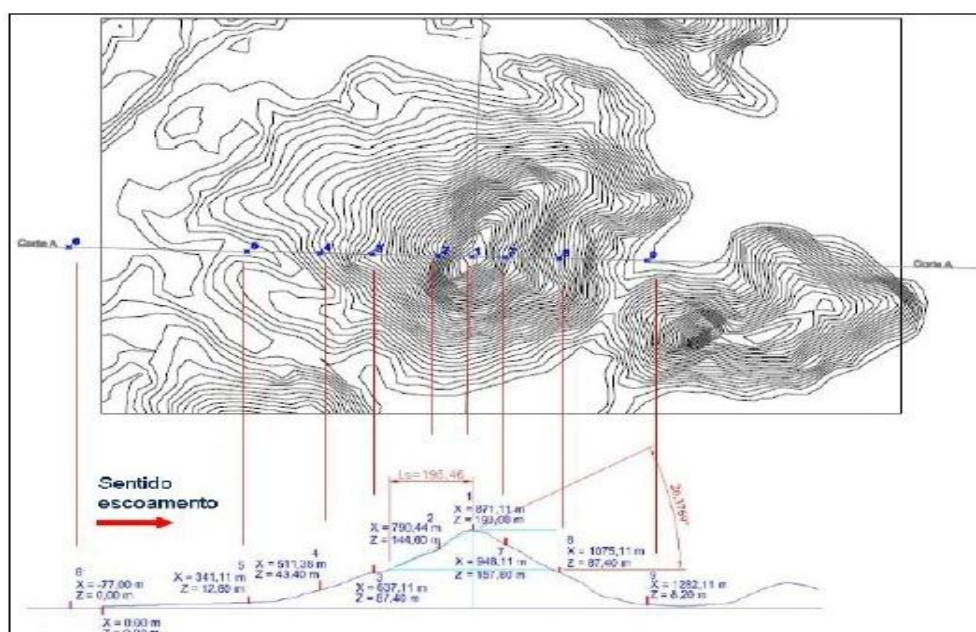
## ANEXOS

## Anexo 3.1 – Potência por unidade de área com vento constante [Manwell et al.,2009]

Velocidade do Vento (m/s)	Potência/área (W/m <sup>2</sup> )
0	0
5	80
10	610
15	2070
20	4900
25	9560
30	16550



Anexo 4.1 – Vista Lateral do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann. [LAC, 2010]



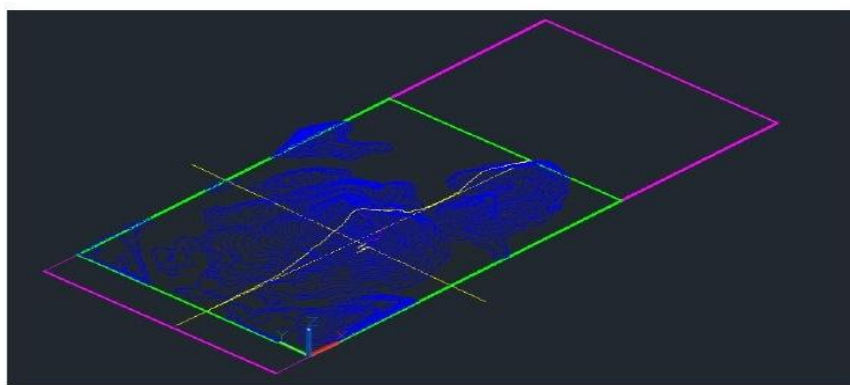
Anexo 4.2 – Coordenadas dos pontos de medição [LAC,2010]

### Anexo 4.3 – Coordenadas dos pontos de medição no modelo computacional.

	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ponto 1	1,0629	0,5451	0,1918
Ponto 2	0,9830	0,5479	0,1439
Ponto 3	0,8176	0,5537	0,0842
Ponto 4	0,7013	0,5577	0,0406
Ponto 5	0,5346	0,5635	0,0099
Ponto 6	0,1240	0,5779	0,0000
Ponto 7	1,1392	0,5424	0,1570
Ponto 8	1,2649	0,5380	0,0872
Ponto 9	1,4700	0,5300	0,0087

### Anexo 4.4 – Velocidades normalizadas medidas no túnel de vento.

Z (mm)	Pto 1	Pto 2	Pto 3	Pto 4	Pto 5	Pto 6	Pto 7	Pto 8	Pto 9
10	0,827	0,328	0,371	0,340	0,332	0,297	0,071	0,128	0,156
15	0,835	0,424	0,428	0,378	0,379	0,341	0,077	0,123	0,167
20	0,843	0,494	0,456	0,407	0,404	0,367	0,085	0,120	0,174
25	0,845	0,540	0,484	0,423	0,424	0,405	0,085	0,122	0,178
30	0,845	0,574	0,500	0,444	0,440	0,436	0,087	0,120	0,180
40	0,845	0,631	0,539	0,480	0,478	0,481	0,172	0,120	0,197
50	0,846	0,673	0,554	0,511	0,502	0,588	0,494	0,123	0,213
70	0,852	0,731	0,611	0,561	0,551	0,646	0,825	0,125	0,227
100	0,870	0,791	0,677	0,624	0,620	0,686	0,858	0,174	0,240
130	0,886	0,831	0,733	0,683	0,674	0,734	0,877	0,475	0,272
160	0,903	0,860	0,781	0,735	0,705	0,781	0,897	0,835	0,372
200	0,921	0,897	0,828	0,790	0,777	0,835	0,919	0,904	0,589
250	0,947	0,930	0,884	0,854	0,842	0,883	0,948	0,929	0,854
300	0,962	0,953	0,930	0,898	0,889	0,921	0,964	0,951	0,913
350	0,973	0,972	0,959	0,943	0,937	0,959	0,981	0,973	0,946
400	0,986	0,987	0,983	0,976	0,968	0,983	0,990	0,989	0,982
450	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
500	1,011	-	1,014	1,015	-	1,009	-	1,012	1,019
550	-	-	1,028	1,033	-	1,027	-	-	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-



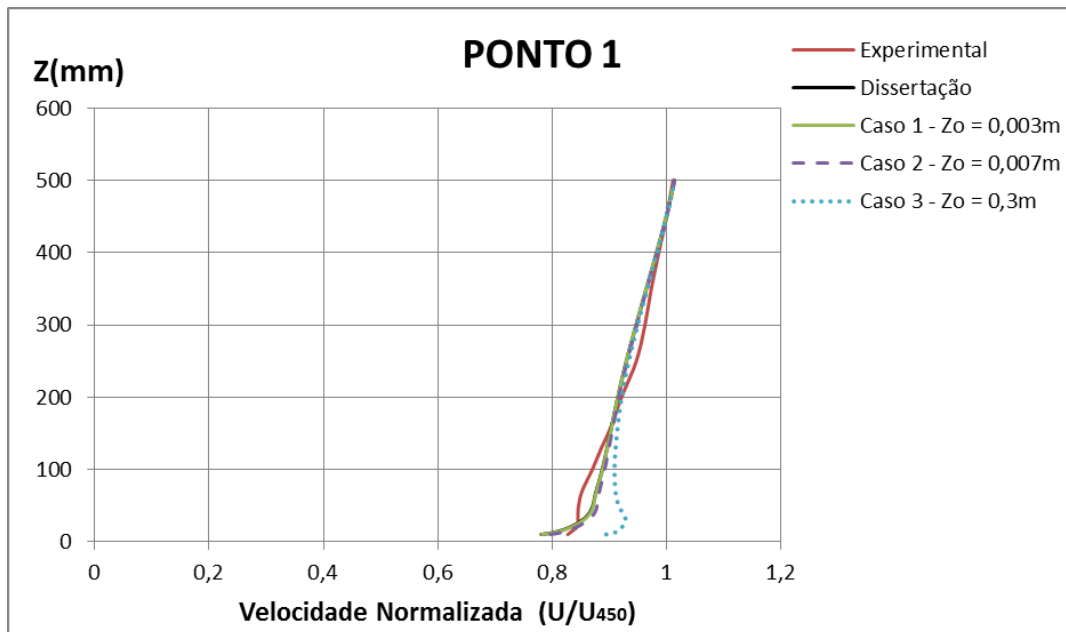
Anexo 4.5 – Região do domínio representada em Autocad.

### Anexo 5.1 – Diferença Relativa entre os Valores Experimentais e cada caso avaliado

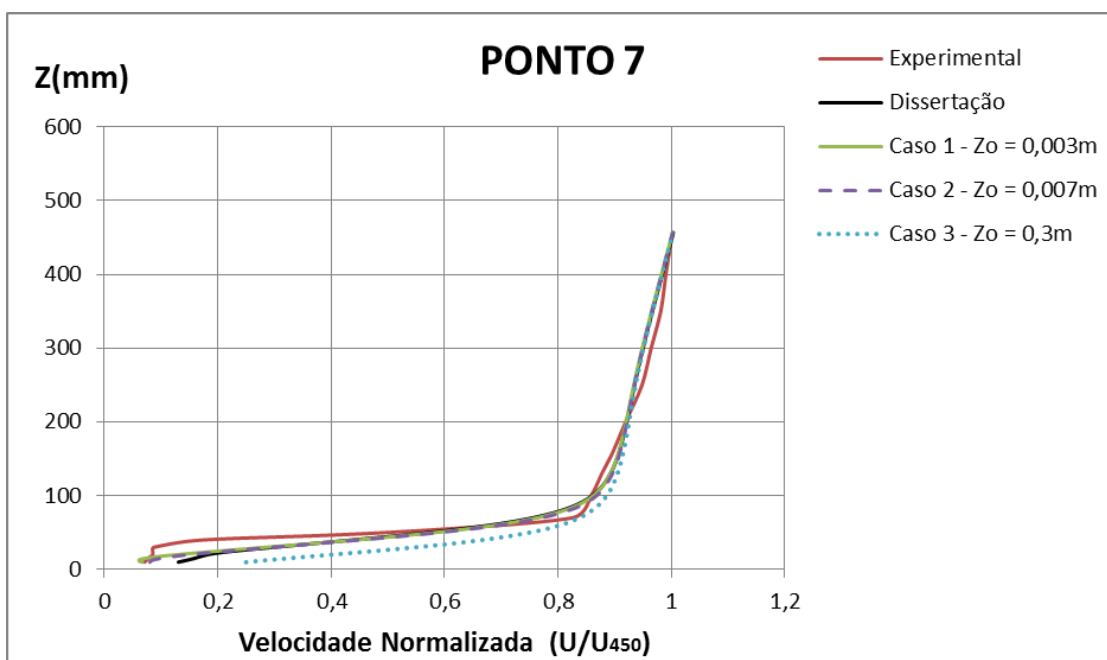
Ponto	CASO 1	CASO 2	CASO 3	Dissertação
1	0,015312	0,015681	0,095464	0,016096
2	0,138816	0,141794	0,158383	0,153627
3	0,061604	0,076231	0,0715841	0,07691
4	0,061604	0,076923	0,056833	0,082103
5	0,110619	0,103205	0,083951	0,107403
6	0,101151	0,111678	0,110577	0,115141
7	0,367098	0,418843	1,344142	0,53175
8	0,231140	0,274394	0,529698	0,231459
9	0,441102	0,584221	0,501679	0,451135
Média	0,169827	0,200330	0,328003	0,196180



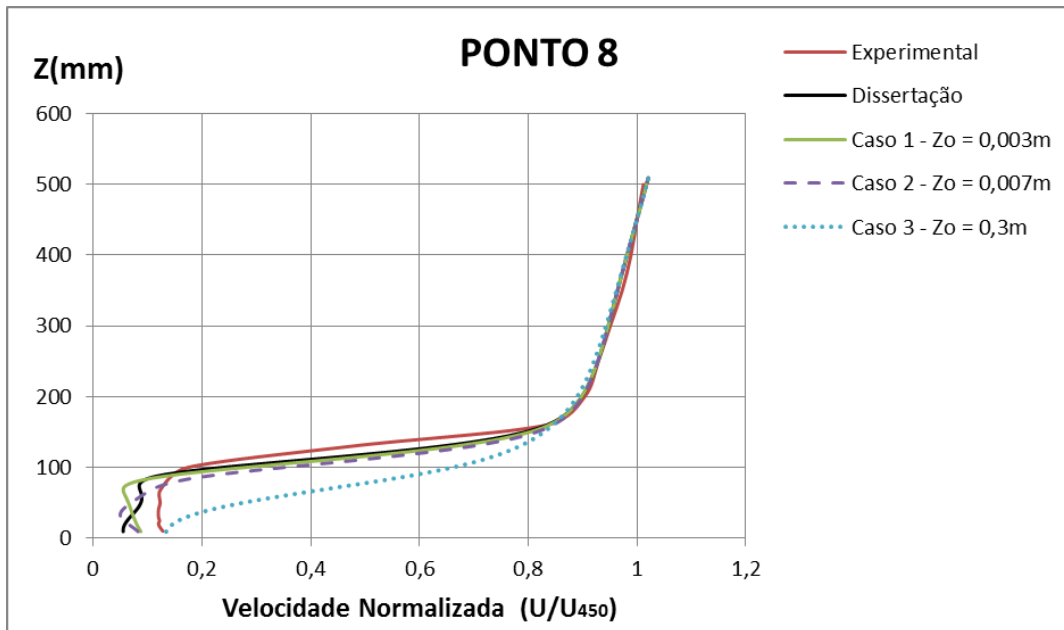
APÊNDICE 1 - Comparação entre os perfis de velocidade nos pontos 1 (topo do morro), e pontos 7,8 e 9 – Região de esteira do morro, com redução de velocidade e recirculação



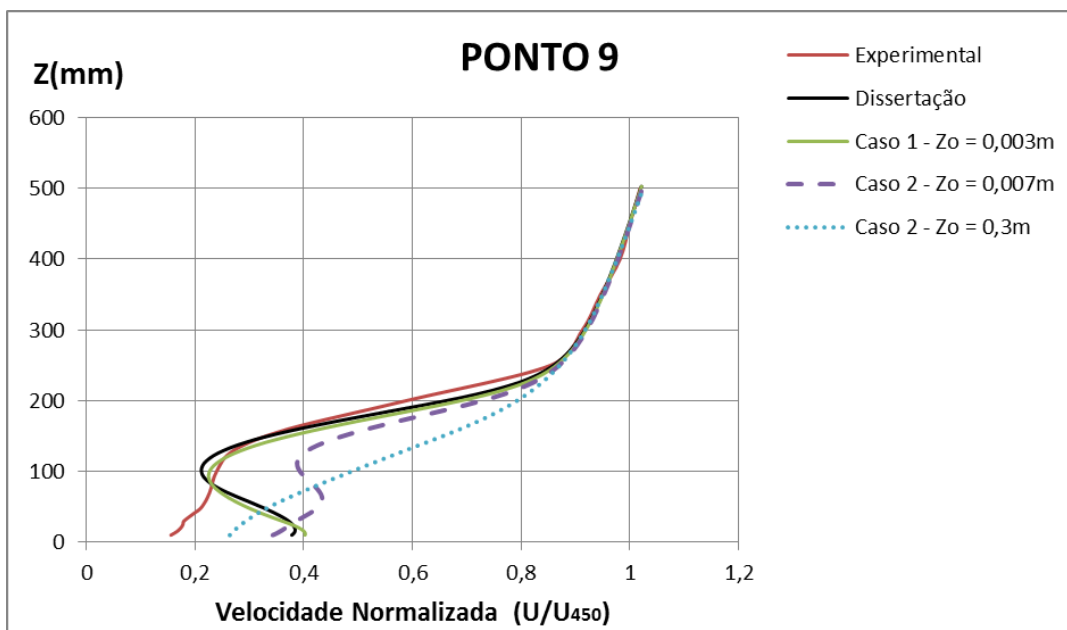
Apêndice 1.1 – Perfil de Velocidades sobre o ponto 1 – Sobre o topo do morro



Apêndice 1.2 – Perfil de Velocidades sobre o ponto 7 – Após o topo do morro

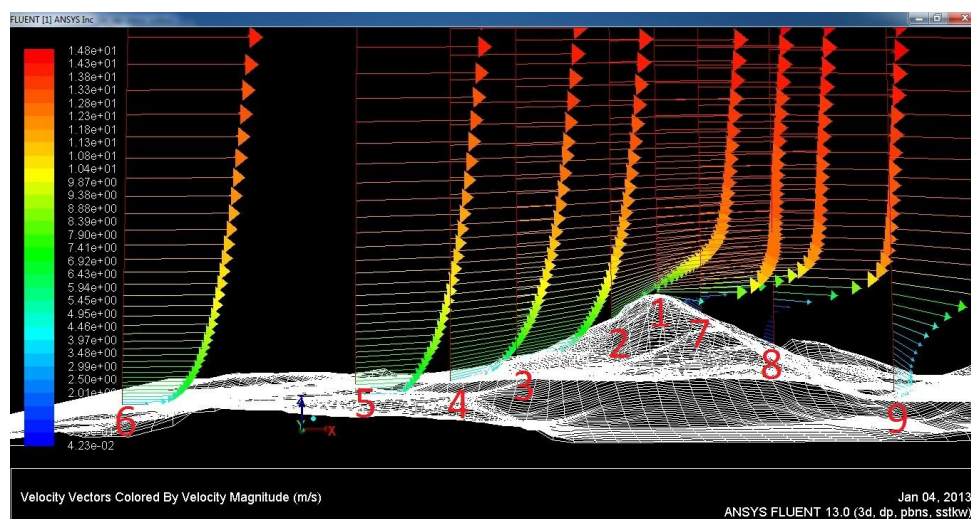


Apêndice 1.3 – Perfil de Velocidades sobre o ponto 8 – Região à jusante do morro

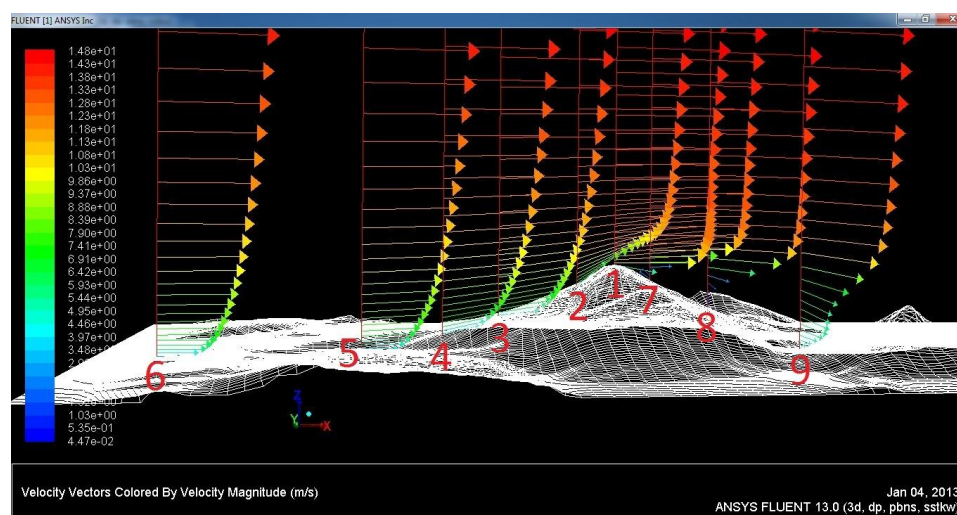


Apêndice 1.4 – Perfil de Velocidades sobre o ponto 9 – Região à jusante do morro

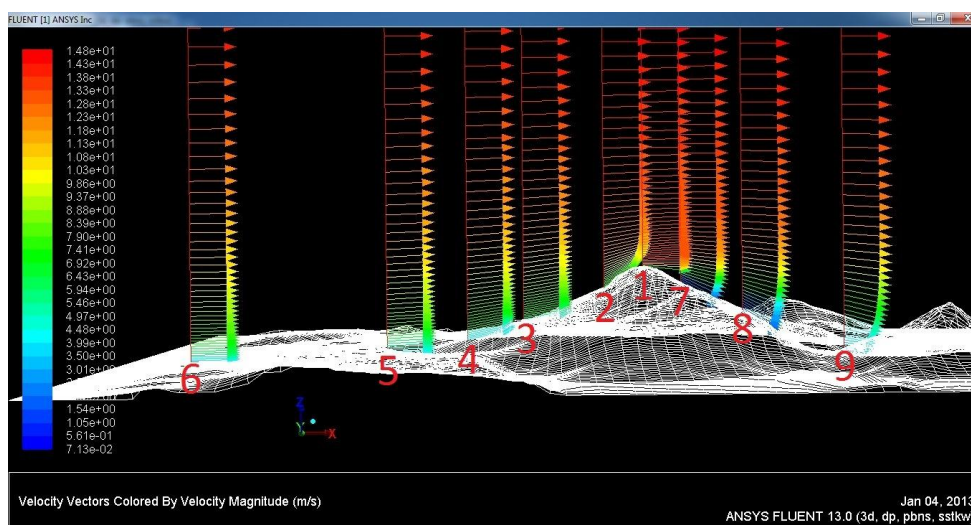
APÊNDICE 2 – Diagrama dos perfis de velocidades dos pontos 1 a 9 sobre o terreno, no plano vertical longitudinal A-A.



Apêndice 2.1 – Perfis de velocidade nos pontos 1 a 9 na diretriz principal A-A, para o caso 1.



Apêndice 2.2 – Perfis de velocidade nos pontos 1 a 9 na diretriz principal A-A, para o caso 2.



Apêndice 2.3 – Perfis de velocidade nos pontos 1 a 9 na diretriz principal A-A, para o caso 3.