

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO EM TERRENOS COMPLEXOS

por

Dalmedson Gaúcho Rocha de Freitas Filho

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 19 de março de 2012

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO EM TERRENOS COMPLEXOS

por

Dalmedson Gaúcho Rocha de Freitas Filho
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Aprovada por:

Prof. Dr. Edgar Pereira PAMPA ENERGIA EÓLICA LTDA

Prof. Dr. Acir Mércio de Loredou-Souza PPGEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Francis H. R. França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 19 de março de 2012

AGRADECIMENTOS

À Capes pela bolsa de mestrado. Ao CESUP pelo serviço de apoio ao usuário e pela disponibilização dos recursos computacionais. À minha professora orientadora, Adriane Prisco Petry, pelo empenho, amizade e dedicação. Aos professores do Promec por transmitirem seus conhecimentos durante o curso das disciplinas. Aos colaboradores do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, especialmente o professor Acir Mércio Loredou-Souza, pela disponibilidade e apoio. Aos colegas e amigos do Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos. Ao professor Edgar Pereira pela amizade e confiança depositada durante estes anos. Aos colegas sócio-fundadores da Terafluxus. Por fim, à minha família, minha namorada e amigos, pelo incentivo, paciência e confiança.

RESUMO

Nos últimos anos, a utilização da energia eólica vem apresentando uma tendência de aumento. Um dos principais aspectos para determinar a viabilidade técnica e econômica de uma instalação eólica é a avaliação precisa da distribuição das velocidades de vento na área de aproveitamento. A instalação de turbinas eólicas em áreas com terrenos complexos tem determinado a necessidade de aprimorar a metodologia de previsão do campo de velocidades do vento visando à melhor determinação da distribuição dos equipamentos e aproveitamento do potencial existente. Neste contexto, esta dissertação apresenta um estudo sobre a aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD para avaliação do potencial eólico e o comportamento do vento sobre um modelo de uma superfície de topografia complexa. Resultados numéricos com diferentes alternativas de modelagem do problema são comparados com dados de um experimento em túnel de vento, visando determinar a metodologia adequada para avaliação do problema proposto. As simulações numéricas do escoamento de ar sobre o terreno são realizadas com o uso do programa ANSYS-Fluent 13.0, que utiliza o método de volumes finitos para a solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS). O estudo é dividido em três casos. No primeiro caso, a rugosidade superficial é negligenciada e o problema de fechamento é contornado com a utilização do modelo de turbulência $k - \omega$ SST. No segundo caso, a rugosidade superficial é estipulada de acordo com modelo utilizado no ensaio experimental e o problema de fechamento é contornado com a utilização do modelo de turbulência $k - \varepsilon$. No terceiro caso, a rugosidade superficial também é estipulada de acordo com modelo utilizado no ensaio experimental e o problema de fechamento é contornado com a utilização do modelo de turbulência $k - \omega$ SST. Os resultados das simulações são apresentados de forma que se possa observar o perfil de velocidades adimensional sobre a superfície da geometria para cada caso, para que seja possível verificar o campo de velocidades sobre a superfície em estudo. O resultado das simulações são comparados com dados experimentais obtidos em túnel de vento: verifica-se um comportamento similar nos perfis de velocidade alcançados. Através da análise do campo de velocidades sobre a superfície em estudo, pode-se obter a localização que apresenta o melhor potencial eólico de uma região. Este processo é conhecido como *Micrositing*.

Palavras-chave: Energia Eólica; Simulação Numérica; Dinâmica de Fluidos Computacional; *Micrositing*.

ABSTRACT

In recent years the use of wind energy has shown an increasing. A key aspect to determine the technical and economic viability for the wind power plant is the accurate assessment of the distribution of wind speeds in the area of utilization. The installation of wind turbines in areas with complex terrain has determined the necessity of improve the methodology for the prediction of wind velocity field in order to better determine the distribution of equipment and utilization of existing potential. In this context this work presents a study on the application of computational fluid dynamics to evaluate the wind potential and the behavior of the wind on a model of a complex surface topography. Numerical results with different alternatives for modeling the problem are compared with data from an experiment in wind tunnel to determine the appropriate methodology for evaluation of the problem. The numerical simulations of the air flow over the terrain are performed using the ANSYS Fluent 13.0 which uses the finite volumes method for solving the Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equation. The study is divided in three cases. In the first one, the surface roughness is neglected and the closure problem is solved by $k-\omega$ SST turbulence model. In the second case, the surface roughness is stipulated according to the model used in the experimental test and the closure problem is solved by $k-\varepsilon$ turbulence model. In the third case, the surface roughness is stipulated according to the model used in the experimental test and the closure problem is solved by $k-\omega$ SST turbulence model. The simulation results are presented so that one can observe the dimensionless velocity profile on the surface in each case in order to check the velocity field on the surface under investigation. These results are compared with experimental data obtained in wind tunnel which shows consistency with them. By analyzing the velocity field on the surface, it can be verified that the exact location where there is the best wind potential of a region. This process is called Micrositing.

Keywords: Wind Energy; Numerical Simulation; Computational Fluid Dynamics; *Micrositing*.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Potencial eólico.....	3
1.1.1	Potência eólica disponível	3
1.2	Micrositing.....	5
1.3	Objetivo e Justificativa	5
1.4	Organização do Trabalho.....	6
2	CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA – CLA.....	8
2.1	Estrutura da Camada Limite Atmosférica	9
2.1.1	Variação de pressão e temperatura	10
2.2	Estratificação e estabilidade da CLA.....	11
2.3	Camada superficial	11
2.3.1	Perfil em lei da potência de velocidade	11
2.3.2	Perfil logaritmo de velocidade.....	12
2.4	Características do terreno.....	13
2.5	Influência da topografia	14
3	MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA DA CLA.....	15
3.1	Dinâmica dos Fluidos	15
3.1.1	Equações de conservação.....	15
3.2	Escoamentos turbulentos	16
3.2.1	Propriedades gerais da turbulência	17
3.3	Modelos lineares	18
3.4	Simulação Numérica Direta - DNS	18
3.5	Simulação de Grandes Escalas – LES	19
3.6	Simulação Numérica via Equações Médias de Reynolds - RANS.....	19
3.6.1	Modelos de uma equação.....	22
3.6.2	O modelo $k - \varepsilon$	22
3.6.3	O modelo $k - \varepsilon$ RNG.....	24
3.6.4	O modelo $k - \omega$	25
3.6.5	O modelo $k - \omega$ SST.....	26
3.7	Método de Volumes Finitos.....	28
3.8	Discretização do domínio	29
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Apresentação do problema.....	30
4.2	Dados Experimentais	30
4.2.1	Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann.....	31
4.3	Modelo Geométrico Computacional.....	35
4.3.1	Obtenção dos pontos das curvas de nível	36
4.3.2	Triangularização dos pontos da superfície.....	37
4.4	Discretização.....	38
4.5	Condições Iniciais e de Contorno	40
4.5.1	Condições iniciais	41
4.5.2	Condições de entrada	41
4.5.3	Condições de saída.....	42
4.5.4	Condições de parede	42
4.5.5	Condições de solo	43

4.6	Simulação Numérica.....	43
4.6.1	Recurso computacional.....	44
5	RESULTADOS	45
5.1	Avaliação da qualidade de malha	46
5.2	Caso 1 - Escoamento sobre a superfície sem rugosidade com $k - \omega$ SST.....	47
5.3	Caso 2 - Escoamento sobre a superfície com rugosidade com $k - \varepsilon$	50
5.4	Caso 3 - Escoamento sobre a superfície com rugosidade com $k - \omega$ SST	52
5.5	Comparação dos casos avaliados.....	54
5.5.1	Perfil de velocidades sobre o ponto 1	54
5.5.2	Perfil de velocidades sobre o ponto 2	55
5.5.3	Perfil de velocidades sobre o ponto 3	56
5.5.4	Perfil de velocidades sobre o ponto 4	57
5.5.5	Perfil de velocidades sobre o ponto 5	58
5.5.6	Perfil de velocidades sobre o ponto 6	59
5.5.7	Perfil de velocidades sobre o ponto 7	60
5.5.8	Perfil de velocidades sobre o ponto 8	61
5.5.9	Perfil de velocidades sobre o ponto 9	62
5.5.10	Diferença relativa entre os casos avaliados	63
5.6	Campo de velocidades sobre a superfície	65
5.6.1	Campo de velocidades sobre a superfície à 100 mm	65
5.6.2	Campo de velocidades sobre a superfície à 150 mm	66
5.6.3	Campo de velocidades sobre a superfície à 200 mm	67
6	CONCLUSÕES	69
7	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS DO AUTOR.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxo de ar através de uma área A e velocidade U [Manwell <i>et al.</i> , 2009]	3
Figura 2.1 – Formação da Camada Limite [Fox e McDonald, 2001].	8
Figura 2.2 – Estrutura da camada limite atmosférica [Boçon, 1998].	9
Figura 3.1 – Hierarquia modelos de turbulência [Piccoli, 2009].	19
Figura 3.2 – A tarefa do método numérico [Maliska, 2004]	28
Figura 4.1 – Vista lateral do Túnel de Vento Profº Joaquim Blessmann. [LAC, 2010]	31
Figura 4.2 – Modelo morro Jaburu fixado no túnel de vento [LAC, 2010]	32
Figura 4.3 – Coordenadas dos pontos de medição [LAC, 2010]	33
Figura 4.4 – Curvas de nível do terreno	36
Figura 4.5 – Região do domínio	37
Figura 4.6 – Superfície Gerada no <i>software</i> Topocal 2.0	38
Figura 4.7 – Malha gerada sobre a superfície	39
Figura 4.8 – Domínio computacional discretizado	40
Figura 4.9 – Domínio computacional e condições de contorno para as simulações	40
Figura 5.1 – Domínio computacional e condições de contorno para avaliação da malha	46
Figura 5.2 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 1	48
Figura 5.3 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 1	49
Figura 5.4 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 1	49
Figura 5.5 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 2	50
Figura 5.6 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 2	51
Figura 5.7 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 2	52
Figura 5.8 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 3	53
Figura 5.9 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 3	53
Figura 5.10 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 3	54
Figura 5.11 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 1	55
Figura 5.12 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 2	56
Figura 5.13 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 3	57
Figura 5.14 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 4	58
Figura 5.15 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 5	59
Figura 5.16 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 6	60
Figura 5.17 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 7	61
Figura 5.18 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 8	62
Figura 5.19 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 9	63
Figura 5.20 – Diferença relativa para os casos avaliados	65
Figura 5.21 – Campo de velocidades a 100 mm	66
Figura 5.22 – Campo de velocidades a 150 mm	67
Figura 5.23 – Campo de velocidades a 200 mm	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Potência por unidade de área com vento constante [Manwell <i>et al.</i> , 2009]	4
Tabela 4.1 – Coordenadas da localização dos pontos de medição	34
Tabela 4.2 – Velocidades normalizadas medidas em túnel de vento	35
Tabela 4.3 – Características de divisão do domínio computacional.....	39
Tabela 5.1 – Avaliação das Malhas	47
Tabela 5.2 – Diferença relativa entre os casos avaliados	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer-Aided Design
CESUP	Centro Nacional de Supercomputação
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLA	Camada Limite Atmosférica
DNS	Direct Numerical Simulation
EDP	Equação Diferencial Parcial
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
LES	Large Eddy Simulation
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations
RNG	Renormalization Group Methods
SIMPLE	Semi Implicit Linked Equations
SST	Shear-Stress Transport
UDF	User-Defined Function
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área superficial
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{1RNG}, C_{\mu}$	Constantes Equações Transporte da Turbulência
D	Domínio
Dh	Diâmetro Hidráulico
E_{ij}	Espectro de Energia de baixa ordem
F_1, F_2	Constantes do modelo de Turbulência $k - \omega$
k	Energia Cinética
l	Comprimento de mistura
m	Massa
P	Pressão
p	Constante
S_M	Termo fonte da quantidade de movimento
S	Termo fonte
s_{ij}	Tensor taxa de deformação
t	Tempo
U	Velocidade média
u_i, u_j	Velocidade
u'	Componente flutuante da velocidade
u^*	Velocidade de fricção
$\overline{u_i' u_j'}$	Tensor de Reynolds
u, v, w	Componentes de velocidade
x_i	Distância
x, y, z	Componentes de direção

Z	Cota vertical
Z_0	Comprimento de rugosidade
Z_d	Deslocamento do plano-zero
Z_{REF}	Cota de referência
α_1	Constante do modelo de Turbulência $k - \omega$
β_1, β_2	Constante do modelo de Turbulência $k - \omega$
β, β^*	modelo de Turbulência
δ_{ij}	Delta Kronecker
ε	Taxa de dissipação de k por unidade de massa
η, η_0	Constante modelo de Turbulência
κ	Constante de Von Kármán
μ	Viscosidade dinâmica
μ_t	Viscosidade turbulenta
μ_{Total}	Viscosidade total
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Nº de Prandtl turbulento para modelo de Turbulência $k - \varepsilon$
σ, σ_*	Constante modelo de Turbulência
σ_{k1}, σ_{k2}	Constantes do modelo de Turbulência $k - \omega$
$\sigma_{\omega1}, \sigma_{\omega2}$	Constantes do modelo de Turbulência $k - \omega$
τ_{ij}	Tensor simétrico de Reynolds

1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia tem aumentado drasticamente nos últimos anos. Nos próximos 25 anos, a demanda por energia no mundo deverá apresentar um acréscimo aproximado de 35%, e, como consequência, aumenta-se a emissão de gases poluentes na atmosfera. Estima-se que 70% dessas emissões são oriundas do setor energético, o que aumenta a preocupação com as mudanças climáticas ora percebidas. [Vasconcelos, 2011].

Após o acidente ocorrido na usina de Fukushima, no Japão, o uso da energia nuclear, adotada em muitos países da Europa, fez agravar a preocupação com os riscos de sua utilização, bem como com os resíduos advindos desta fonte energética.

Prova disto é o fato da chanceler alemã Angela Merkel anunciar recentemente o desligamento gradual das 17 usinas nucleares de seu país até 2022; para ela, é possível aos países crescer, criar empregos e possuir uma economia próspera com a capacidade energética focada em recursos renováveis. [Vilicic, 2011]. Com isso, o investimento em fontes energéticas limpas que possa gerar lucros sem consequências ambientais, é um caminho que tende ao sucesso. [Vasconcelos, 2011]. Desta forma, a ideia da utilização da energia eólica vem crescendo dentro do setor energético.

Os principais fatores deste desenvolvimento são a redução das emissões de gases nocivos à atmosfera e a redução da dependência de fontes tradicionais de geração de energia elétrica.

O Brasil também acompanha a tendência mundial: é visível o crescimento dos empreendimentos eólicos. O planejamento energético oficial prevê um contínuo desenvolvimento desta alternativa.

A conversão da energia do vento em energia elétrica depende fundamentalmente de dois fatores: primeiro, o *design* da turbina e, segundo, o projeto do parque eólico. Para a distribuição das turbinas sobre o terreno é essencial possuir um conhecimento sobre o potencial eólico em cada ponto da área do projeto. Este estudo é conhecido como *micrositing*. Entretanto, os métodos usuais de *micrositing* apresentam uma deficiência, sob o ponto de vista de precisão de acordo com instituições financeiras e investidores. [Mönnich e Pacheco, 2009].

Os riscos no investimento em projetos eólicos estão diretamente ligados à precisão com que é feita a previsão da estimativa de energia que será gerada pelo parque. Isto ocorre

porque os investimentos nesses projetos são baseados no rendimento anual de energia, que é um fator fundamental para a análise da viabilidade econômica de um parque eólico.

Em modelos tradicionais, como o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), as características do escoamento são simplificadas, pois estes modelos são baseados no conceito de escoamento linearizado, que fornece rapidamente uma análise do fluxo de ventos. Entretanto, estes tendem a subestimar a turbulência e superestimar a velocidade do vento. [Stangroom, 2004].

Com a evolução das turbinas eólicas, tornou-se possível explorar regiões, que não se encontram somente em áreas litorâneas ou em terrenos planos, mas em terrenos com superfícies complexas. Assim, é necessário um maior desenvolvimento de ferramentas de *micrositing*. Com isso, modelos que utilizam a dinâmica de fluidos computacional podem ser úteis para aprimorar a aplicação de modelos tradicionais. [Mönnich e Pacheco, 2009]

A dinâmica de fluidos computacional – CFD é uma ferramenta altamente difundida na engenharia, que pode ser empregada para melhorar a estimativa de prognósticos de vento em terrenos complexos. Isso se deve ao fato de que esta ferramenta modela as características do fluxo complexo, isto é, características como a turbulência e re-circulação. Entretanto, o uso da dinâmica dos fluidos computacional para análise da velocidade do vento com a finalidade de avaliar o potencial eólico de uma área específica é recente, especialmente porque os problemas envolvem grandes dimensões e exigem recursos computacionais avançados. Apesar do uso de CFD ser uma metodologia bem estabelecida em diversas áreas da engenharia, a sua aplicação para a análise da camada limite atmosférica requer investigação, como os modelos de turbulência, a discretização espacial e a definição das condições de contorno são alguns dos principais aspectos a serem avaliados.

Neste trabalho, apresentam-se os resultados de simulações numéricas do escoamento do ar sobre um terreno complexo, onde se empregam dois diferentes modelos de turbulência e diferentes rugosidades superficiais, comparando os resultados com os dados de medições realizadas sobre um modelo semelhante em um túnel de vento. Esta abordagem permite a comparação de dados com um grande número de pontos, em condições controladas, quando comparada a medições em campo. Como resultado, é possível avaliar, dentre os parâmetros empregados, as limitações dos modelos, bem como a modelagem mais adequada para a análise de *micrositing*.

1.1 Potencial eólico

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento, também conhecido como vento. Ela varia constantemente a sua velocidade e a direção do seu deslocamento, e assim necessita-se de uma análise do seu comportamento espacial e temporal. [Custódio, 2009]. Para uma estimativa da potência eólica que poderá ser extraída por uma turbina eólica, este capítulo apresenta a definição de conceitos fundamentais sobre a avaliação do potencial eólico.

1.1.1 Potência eólica disponível

Considera-se um fluxo de ar que atravessa a área A transversal de um disco, conforme ilustrado na Figura 1.1.

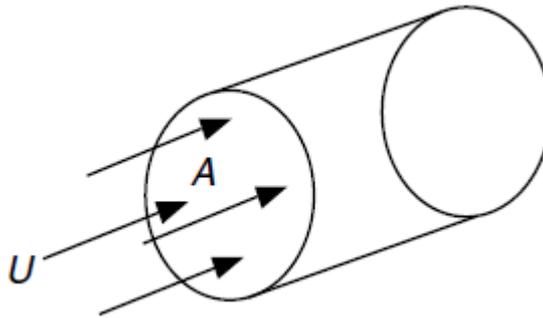


Figura 1.1 – Fluxo de ar através de uma área A e velocidade U [Manwell *et al.*, 2009]

A partir da equação da continuidade, Equação 1.1, o fluxo de ar que atravessa a área A é função da massa específica do ar e a sua velocidade U . Ela é obtida por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (1.1)$$

Onde U representa a velocidade do escoamento, A representa a área da seção transversal e ρ a massa específica.

A energia cinética por unidade de tempo é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 \quad (1.2)$$

A potência do vento disponível que atravessa uma seção de área A é dada por:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (1.3)$$

A Equação 1.3 representa a potência disponível do vento por unidade de área em função da velocidade do vento U e da massa específica do ar ρ no local, é definida como densidade de potência.

A potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade do ar. Na Tabela 1.1 são apresentados alguns exemplos da potência disponível em função da velocidade do vento, de maneira que destaca-se a importância da correta previsão da distribuição da velocidade do vento no ponto de instalação de uma turbina eólica.

Tabela 1.1 – Potência por unidade de área com vento constante [Manwell *et al.*, 2009]

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

Em uma turbina eólica de eixo horizontal, segundo Betz, poderá extrair teoricamente no máximo 59,3% da potência eólica disponível na área de cobertura da turbina. Ao considerar a eficiência aerodinâmica da transformação da energia mecânica em elétrica, a potência convertida em uma turbina real é inferior ao máximo de Betz. Em uma moderna

turbina eólica, aproximadamente apenas 45% da energia disponível é convertida. [Manwell *et al.*, 2009].

1.2 Micrositing

Micrositing é definido como processo empregado para determinar a melhor localização de uma ou mais turbinas eólicas em um terreno. O principal objetivo do *micrositing* é encontrar a melhor localização das turbinas eólicas para maximizar a produção de energia. Com isso, é necessária uma combinação de informações detalhadas do comportamento do vento no local da instalação. [Manwell *et al.*, 2009]. Durante a última década pesquisadores têm desenvolvido métodos para aplicabilidade da dinâmica de fluidos computacional para previsão da geração de energia através dos ventos.

No trabalho de Stangroom, o objetivo é mostrar as capacidades da aplicabilidade do uso de CFD para análise de vento sobre regiões reais do terreno e avaliar seu uso para aplicações de energia eólica. Entretanto até aquele momento este tipo de análise não era amplamente utilizada na indústria de energia eólica devido ao custo computacional e os conhecimentos necessários para este tipo de estudo. [Stangroom, 2004]

No artigo de Xiao, foi investigado o comportamento do vento em um terreno complexo comparando os resultados obtidos em simulações de CFD com dados experimentais medidos sobre o terreno, onde observou-se que os efeitos do clima e do terreno deve ser referenciada na análise de *micrositing* em terrenos complexos. [Xiao *et al.*, 2010].

Micrositing é um assunto desafiador que envolve a dinâmica dos fluidos e a tomada de decisões, que são relevantes no processo de planejamento de um parque eólico. [Conover e Davis, 1994].

1.3 Objetivo e Justificativa

Esta dissertação tem como principal objetivo de apresentar uma metodologia de avaliação de potencial eólico em terrenos complexos, mostrando as limitações e qualidades dos modelos estudados para avaliação do potencial eólico de uma determinada região.

Para isso, o método numérico é aplicado para descrever o comportamento do vento em terrenos complexos através do uso de CFD. São realizadas simulações sobre um modelo reduzido de um terreno complexo, comparando os resultados alcançados com medições

experimentais realizadas em túnel de vento. Durante as simulações foram avaliados três casos, usando dois modelos de turbulência e diferentes valores de rugosidade superficial. Em um dos casos foi empregado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$, pois este modelo é largamente empregado em programas específicos de eólica, como o WindSim. [Fallo, 2007]. Nos outros casos foi utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, pois é o modelo mais indicado para escoamento em superfícies complexas [Wilcox, 1998] e [Silveira Neto, 2002], onde é avaliado o efeito da rugosidade no comportamento do escoamento.

Para a aplicação, foi gerado um modelo da superfície a partir das coordenadas das curvas de nível do terreno. Trata-se de um terreno complexo, onde os perfis de velocidades sobre alguns pontos sobre a superfície foram medidos em túnel de vento. Através das características do escoamento utilizadas no túnel de vento, faz-se uma reprodução deste escoamento em um domínio computacional da geometria modelada através do método de volumes finitos com o auxílio da ferramenta computacional ANSYS-Fluent 13.0.

A opção de comparar as simulações realizadas com dados experimentais em túnel de vento é feita devido ao maior número de pontos medidos, condição mais controlada e o comportamento dos perfis de velocidade sobre pontos do modelo experimental. Assim os resultados alcançados com o método numérico são apresentados e comparados com dados experimentais.

1.4 Organização do Trabalho

Os assuntos discutidos nesta dissertação são apresentados nesta seção. Desta forma, os capítulos avaliados abordam os seguintes assuntos:

O segundo capítulo apresenta uma análise dos principais aspectos relacionados à camada limite atmosférica. Inicia-se com uma pequena descrição de aspectos históricos relacionados a origem do conceito de camada limite, descrevendo o mecanismo de formação e a sua estrutura, incluindo o comportamento relacionado à variação de pressão e temperatura. Também faz uma pequena abordagem sobre estratificação, estabilidade e as equações dos perfis de velocidades utilizados na engenharia. Por fim, expõe-se uma classificação dos tipos de terrenos e também qual a influência da rugosidade e topografia sobre a camada limite atmosférica.

O terceiro capítulo apresenta a modelagem matemática empregada para análise numérica da camada limite atmosférica. Faz-se uma revisão da dinâmica dos fluidos,

apresentando as equações governantes e da turbulência, com uma breve explicação do fenômeno e as suas características. Após, apresenta-se alguns modelos utilizados para a solução da turbulência e a discretização do domínio computacional.

O quarto capítulo ilustra a metodologia utilizada nesta dissertação. Inicialmente apresentam-se os dados experimentais utilizados na dissertação. A seguir faz-se a descrição da metodologia empregada para a obtenção do modelo geométrico computacional, o domínio e a discretização espacial incluindo as condições de entrada e de contorno da simulação. Por fim, os parâmetros para a solução da simulação numérica. Assim é definido o problema a ser analisado.

O quinto capítulo é referente aos resultados alcançados na simulação. Através de uma avaliação da qualidade da malha, é apresentada qual foi selecionada a partir do estudo da sua influência nos resultados das simulações. Após, uma análise dos perfis de velocidade encontrados sobre os pontos de interesse e uma comparação destes mesmos com dados experimentais em túnel de vento e a ilustração do campo de velocidades sobre a superfície complexa.

No sexto capítulo, as conclusões e a avaliação dos trabalhos futuros referentes aos resultados obtidos no capítulo 5 são apresentadas. No final da dissertação são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho em ordem alfabética e o anexo.

2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA – CLA

O conceito de camada limite foi apresentado no artigo “*Fluid Motion With Very Small Friction*” por Ludwig Prandtl em 1904. Ele mostrou que em escoamentos viscosos sobre uma superfície, pode ser analisado dividindo-o em duas regiões. Em uma camada muito fina sobre a superfície (camada limite), onde o efeito da viscosidade é importante, e outra sobre esta camada, onde o efeito da viscosidade pode ser desprezível, assim o fluido pode ser tratado como invíscido. [Schlichting, 1978].

A partir de um escoamento sobre uma superfície sólida, pode-se observar a formação da camada onde há uma desaceleração do fluido entre as camadas fluidas próximas à superfície. O fluido é aderido à superfície a partir do bordo de ataque, devido à condição de não-deslizamento. Com isso, o fluido em contato direto com um objeto sólido possui a velocidade do próprio sólido. Assim, as camadas de fluido com menor velocidade exercem uma força retardadora no fluido sobre ele até uma distância onde a velocidade do escoamento não seja perturbada pela superfície. [Fox e McDonald, 2001], esta região é denominada de camada limite.

Para um melhor entendimento, a Figura 2.1 ilustra em forma esquemática o processo de formação da camada limite.

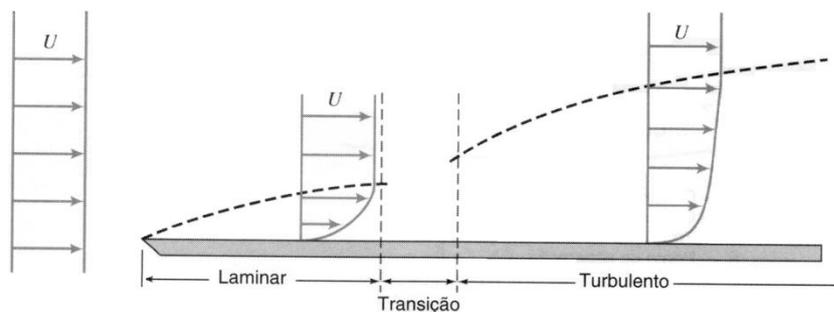


Figura 2.1 – Formação da Camada Limite [Fox e McDonald, 2001].

A Camada Limite Atmosférica – CLA, também conhecida como camada limite planetária, localiza-se na troposfera é diretamente afetada pela superfície terrestre, e os seus efeitos (atrito, calor e resfriamento) são sentidos em escala de tempo menores que um dia. Os fluxos de calor, quantidade de movimento ou matéria são realizados por movimentos turbulentos em uma menor escala da espessura da camada limite. [Garratt, 1992].

A CLA exerce uma grande importância na análise do potencial energético de uma fazenda eólica, pois as turbinas são instaladas nesta região e são diretamente afetadas pela superfície terrestre.

2.1 Estrutura da Camada Limite Atmosférica

A altura da CLA varia consideravelmente de acordo com as condições atmosféricas ao longo do dia. Isso porque é fortemente influenciada pelo ciclo diário de aquecimento e resfriamento da superfície terrestre. À noite a espessura da CLA turbulenta é menor que durante o dia e é ocasionada pelo resfriamento da superfície. Com a superfície mais fria, há um fluxo de calor da atmosfera para o solo, originando um gradiente vertical positivo de temperatura e conseqüentemente há um estreitamento da camada limite próxima ao solo. Esta camada é chamada de camada estável noturna. [Stangroom, 2004].

Durante o dia, a camada de ar acima do solo é aquecida devido a um fluxo de calor, resultando um gradiente vertical negativo de temperatura que desconfigura a camada estável noturna. Esta nova camada formada possui alta turbulência devida aos efeitos de cisalhamento e empuxo próximos à superfície. [Boçon, 1998]. Estas variações aumentam a complexidade da simulação utilizando modelos numéricos ou simulações experimentais em túnel de vento. A Figura 2.2 apresenta a estrutura da CLA sobre uma superfície.

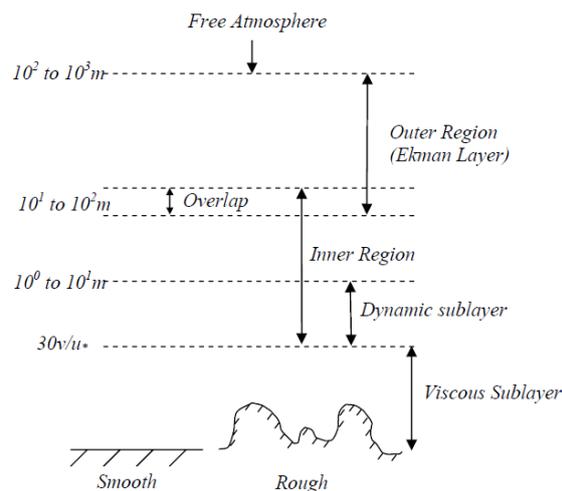


Figura 2.2 – Estrutura da camada limite atmosférica [Boçon, 1998].

A subcamada dinâmica é uma região completamente turbulenta. Esta região encontra-se suficientemente próxima à superfície e isso faz com que as forças de empuxo e Coriolis possam ser negligenciadas. A subcamada dinâmica ocupa toda a camada superficial que é

aproximadamente 10% da CLA [Stangroom, 2004]. A região chamada de “*Overlap*” faz a ligação entre as regiões interna e externa.

Zilitinkevich e Baklanov [2002] descreveram diferentes métodos para calcular a altura da camada limite, baseados em parâmetros adimensionais, como o número de Richardson, com certas restrições. A rugosidade da superfície possui um considerável efeito na altura da camada limite que é o ponto em que a velocidade média do vento torna-se independente do solo, esta altura é controlada principalmente pelos gradientes de pressão. [Stangroom, 2004].

2.1.1 Variação de pressão e temperatura

De acordo com o texto de Stangroom em 2004, a variação da pressão atmosférica é descrita pela Equação 2.1.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (2.1)$$

Onde g representa a aceleração da gravidade e ρ a massa específica. Como a massa específica é função da altitude, a equação fundamental da atmosfera fica:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Assim, os gradientes de pressão horizontal serão independente da altura.

O aquecimento desigual da superfície terrestre, faz com que a CLA não tenha um equilíbrio térmico. Com isso, as variações de temperatura ocasionam variações da massa específica que modificam as forças gravitacionais. Não havendo escoamento na direção vertical, a força gravitacional é equilibrada pelos gradientes de pressão. Com isso, a força de empuxo, criada pela variação da massa específica, altera o perfil de velocidades diretamente como uma fonte, e assim indiretamente afeta a tensão de cisalhamento turbulenta.

2.2 Estratificação e estabilidade da CLA

Se um fluido for composto por várias camadas de densidades diferentes, a tendência, devido à aceleração da gravidade, que as parcelas de fluido com maior densidade se organizarem abaixo das que possuem menor densidade, e assim o fluido é descrito como estratificado.

Se as parcelas com maior densidade estiverem abaixo das com menor densidade, o fluido é considerado estável. Não havendo ou havendo pouca variação na temperatura e conseqüentemente pouca variação da densidade do fluido, o mesmo é considerado neutro e não haverá efeitos de estratificação [Stangroom, 2004].

2.3 Camada superficial

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

2.3.1 Perfil em lei da potência de velocidade

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

$$\frac{U}{U(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (2.3)$$

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 Loredo-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, a velocidade do vento aumenta indefinidamente. Também ocorre que o modelo não apresenta uma justificativa teórica, contudo representa consideravelmente o perfil médio de velocidades, assim muitas vezes atribui-se características não realísticas ao modelo. Na camada próxima à superfície este ajuste é pobre.

2.3.2 Perfil logaritmo de velocidade

É amplamente aceito que o perfil de velocidade média da camada limite atmosférica varia de acordo com uma função logarítmica na subcamada dinâmica. A sua obtenção é oriunda a partir da expressão do fluxo da quantidade de movimento na camada superficial dada por:

$$\overline{u'w'} = -l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.4)$$

O comprimento de mistura l praticamente não varia com a altura na camada superficial. O comprimento de mistura é dado por:

$$l = \kappa z \quad (2.5)$$

Onde κ representa a constante de von Kármán e possui o valor $\kappa = 0,4$ [Schlichting, 1978]. Quando integrados ao longo da altura $z = z_0$ para qualquer altura z obtêm-se a equação logarítmica.

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - z_d}{z_0} \quad (2.6)$$

A expressão utilizada apresenta um bom ajuste na camada próxima à superfície, mas o ajuste é insuficiente na região superior da CLA. Os parâmetros como a velocidade de corte, u_* , e a rugosidade aerodinâmica, z_0 , dependem das características físicas do terreno e do

vento. A velocidade de corte é uma medida da declividade do perfil logaritmo e a rugosidade aerodinâmica define a intersecção do perfil de velocidades média com o plano de deslocamento zero. A lei logarítmica apresenta algumas vantagens em relação a lei potencial. Nela aparece um fator de escala de comprimento de rugosidade representado por z_0 . A lei logarítmica é oriunda da teoria e também possui um bom ajuste próximo à superfície. [Loredo-Souza *et al.*, 2004].

2.4 Características do terreno

A CLA é diretamente afetada pelas características superficiais do terreno. A rugosidade superficial de uma determinada área pode ser determinada pelos elementos de rugosidade como árvores, morros, vales e prédios contidos nela. Embora os efeitos da rugosidade superficial nos perfis de velocidade média e temperatura sejam bem conhecidos, existe uma dificuldade de identificar uma escala de comprimento que caracteriza a rugosidade superficial [Antonia e Krogstad, 1999].

Em geral, a rugosidade de uma determinada superfície pode ser parametrizada em uma escala de comprimento de rugosidade z_0 , utilizado na Equação (2.6), para representar o fator de escala da rugosidade superficial. De acordo com a norma brasileira NBR-6123 [1988] a superfície do terreno pode ser classificada 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 considerável distância 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 numerosos, grandes, 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.

2.5 Influência da topografia

A forma da topografia pode possuir maiores consequências no escoamento do vento que os efeitos da rugosidade superficial ou a estabilidade do escoamento. Em terrenos complexos, ocorre o aumento da velocidade devido à aproximação das linhas de corrente. Assim o fluxo continua ao longo dessas camadas, porém com uma maior velocidade. Após o obstáculo, há o afastamento das linhas de corrente e conseqüentemente o fluxo desacelera. 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].

No Brasil, os principais investimentos em parques eólicos estão localizados em regiões planas, onde o perfil de velocidade do vento é desenvolvido e entendido. Havendo a indisponibilidade de novas áreas planas para futuros investimentos, não se pode descartar regiões em terrenos complexos. Nestas regiões, com a presença de morros, a influência deles pode ser benéfica para disponibilidade de energia, pois a velocidade do vento aumenta no topo dos morros, entretanto ocorre a separação do escoamento na região de esteira fazendo com que a instabilidade do escoamento deva ser consideradas como aspectos importantes no aproveitamento eólico local. [Mönnich e Pacheco, 2009].

Os modelos algébricos utilizados pela maioria dos programas computacionais para energia eólica, não são adequados para este tipo de estudo do potencial eólico em terrenos complexos. Assim neste trabalho o estudo dos efeitos da topografia será feito através da utilização de ferramentas de CFD.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA DA CLA

A solução do sistema de equações originadas da modelagem matemática baseadas nas leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento do meio contínuo possui solução exata apenas para alguns casos quando o escoamento é considerado simples. Devido à restrita aplicabilidade da solução direta das equações de Navier-Stokes, é necessária a busca de soluções aproximadas, especialmente em escoamentos turbulentos. A partir do emprego de métodos numéricos, obtém-se a solução as equações de conservação para escoamentos laminares e turbulentos. O estudo desenvolvido por Reynolds em 1895 é a base matemática da maioria das ferramentas computacionais baseadas na metodologia de CFD.

Neste capítulo é feita uma descrição da metodologia de análise matemática e numérica da CLA, onde são abordados os modelos e códigos e utilizados neste trabalho para a simulação do escoamento. Para isso, alguns conceitos e modelos serão revistos com o objetivo de um melhor entendimento da ferramenta de CFD, que é utilizada neste trabalho.

3.1 Dinâmica dos Fluidos

Através da solução das equações diferenciais de conservação de massa e quantidade de movimento é possível avaliar a dinâmica dos fluidos. As equações governantes para escoamento de fluidos podem ser aplicadas em escoamentos atmosféricos e em experimentos em túnel de vento.

3.1.1 Equações de conservação

Os escoamentos atmosféricos satisfazem as equações gerais da mecânica dos fluidos. A equação de Navier-Stokes na forma conservativa é:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3.1)$$

Os termos do lado esquerdo da equação se referem ao transporte de fluido, e os termos do lado direito se referem à pressão e tensões viscosas. Esta equação também é conhecida como equações do princípio da quantidade de movimento.

A Equação 3.2 representa a equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3.2)$$

Para escoamentos incompressíveis, a Equação 3.3 representa a conservação de massa:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.3)$$

3.2 Escoamentos turbulentos

Através do experimento feito por Osborne Reynolds em 1883, que injetou um corante em um duto transparente com fluxo de água, foi possível observar os diferentes regimes de escoamento. No início deste experimento, o escoamento no interior do duto era laminar, de modo que as camadas de fluido deslocavam-se uma sobre as outras. Com o aumento da velocidade do escoamento, observaram-se grandes oscilações causando uma mistura completa do corante com a água. Isto ocorreu devido à presença de flutuações de velocidade transversal à direção do escoamento. Este fenômeno foi chamado de turbulência [Möller e Silvestrini, 2004].

Nesta mesma época, Boussinesq, em 1877, propôs estudar o escoamento turbulento como laminar, porém alterando a viscosidade por um conceito de viscosidade turbulenta. Ele supôs que as tensões turbulentas são proporcionais a taxa de deformação, como Stokes, porém com um coeficiente de proporcionalidade denominado de viscosidade turbulenta, que é muito maior que a viscosidade molecular do fluido. [Silveira Neto, 2002].

3.2.1 Propriedades gerais da turbulência

Em 1937 von Kármán definiu turbulência como:

“Turbulência é um movimento irregular que em geral aparece em fluidos, gasosos ou líquido, quando o escoamento passa sobre superfícies sólidas ou quando uma camada do mesmo fluido passa sobre a outra.”

Com o passar do tempo, os pesquisadores afirmaram que o termo “movimento irregular” é impreciso, pois um movimento irregular é aquele que normalmente é aperiódico e assim não pode ser descrito como uma função direta das coordenadas de espaço e tempo. O problema na definição de von Kármán é que os escoamentos turbulentos não podem apenas ser descritos como irregulares. [Wilcox, 1998]. Para proporcionar uma melhor definição da turbulência Hinze [1975] apresentou a seguinte definição revisada:

“O fluido em movimento turbulento é uma condição irregular do escoamento em que as várias partes do fluido mostram uma variação aleatória com coordenadas de espaço e tempo, de maneira que estatisticamente seus valores médios podem ser avaliados”

Não existe uma definição exata para turbulência que aborde todas as suas características. Em 1972, Tennekes e Lumley estabeleceram, aceito até o momento, que um escoamento turbulento se caracteriza por [Möller e Silvestrini, 2004]:

- Irregularidade – é impossível fazer uma análise determinística, trabalha-se com métodos estatísticos;
- Difusividade – faz a mescla do fluido, facilita a transferência de calor e atrasa a separação da camada limite;
- Altos números de Reynolds – a turbulência aparece quando há uma instabilidade em um escoamento laminar devido ao aumento do número de Reynolds;
- Tridimensionalidade da Vorticidade – escoamentos turbulentos são tridimensionais e rotacionais, e apresentam flutuações tridimensionais da

vorticidade. Afirma-se também que escoamentos bidimensionais não são turbulentos;

- Dissipação – escoamentos turbulentos sempre apresentam dissipação e a viscosidade altera o movimento turbulento de escalas pequenas em calor;
- Meio contínuo – a menor escala da turbulência é maior que a escala molecular;
- “Escoamentos turbulentos são escoamentos” – a turbulência é uma particularidade do escoamento, não do fluido.

3.3 Modelos lineares

Segundo Stangroom, o modelo linear para análise de *micrositing* mais utilizado é o modelo utilizado pelo programa WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), desenvolvido na Dinamarca em 1987 pelo laboratório de engenharia do vento RISØ, baseado no conceito de modelos de escoamento linearizado. Ele contém modelos simplificados para turbulência e rugosidade superficial e assim fornece rapidamente uma análise do escoamento de vento. O uso deste modelo é adequado para superfícies planas, entretanto ele não consegue prever adequadamente a separação e recirculação do escoamento. Este modelo tende a superestimar a velocidade do vento e subestimar a turbulência. [Stangroom, 2004].

3.4 Simulação Numérica Direta - DNS

A Simulação Numérica Direta - DNS (*Direct Numerical Simulation*) para a solução das equações de Navier-Stokes, para escoamento turbulento, é o principal objetivo para ser alcançado, quando se trata em simulação numérica de escoamentos de fluidos. Isto porque este método obtém diretamente a solução das equações de conservação e da continuidade sem a necessidade da utilização de constantes ajustáveis. Entretanto, o uso desta abordagem ainda está restrita devido à necessidade de avanços computacionais. [Ludwig, 2011] e [Piccoli, 2009].

A limitação do uso de DNS está relacionada à multiplicidade de escalas de turbulência presente nos escoamentos turbulentos, para obter a solução direta de todas as escalas envolvidas o domínio computacional necessita de uma discretização espacial e temporal que conduz a um número muito elevado de equações a serem resolvidas. [Petry, 2002]. A solução de escoamentos de turbulência sem modelos de fechamento revolucionou o estudo da

turbulência, porém a sua utilização como uma ferramenta de engenharia ainda requer avanço dos recursos computacionais. [Stangroom, 2004].

3.5 Simulação de Grandes Escalas – LES

A Simulação de Grandes Escalas - LES (*Large Eddy Simulation*) é a metodologia utilizada no estudo de Análise Numérica na Engenharia do Vento Computacional por Piccoli em 2009. Foi desenvolvida a partir do artigo de Smagorinsky em 1963, detalhando a física de escalas turbulentas menores que servem para retirar energia das escalas maiores, de maneira que o seu efeito possa ser modelado. Assim, este método soluciona diretamente as grandes escalas que governam a dinâmica local do escoamento e utiliza modelos de sub-malha para avaliar as escalas de caráter mais universal. As grandes escalas são responsáveis pelo transporte de energia e quantidade de movimento, e as pequenas escalas, menos afetadas pelas condições de contorno, tendem a ser isotrópicas. [Silveira Neto, 2002] e [Piccoli, 2009].

3.6 Simulação Numérica via Equações Médias de Reynolds - RANS

Na Figura 3.1, é apresentado uma comparação entre alguns modelos em função de suas características e o tempo de processamento para cada abordagem.

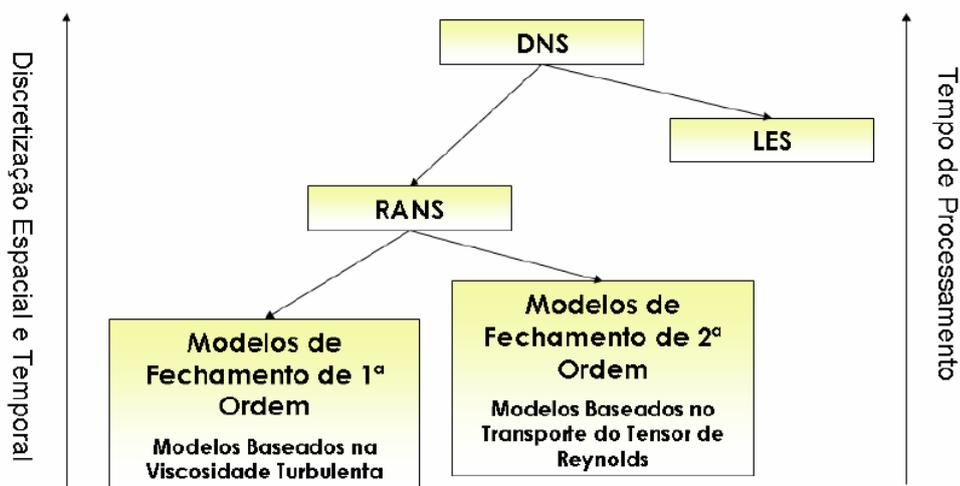


Figura 3.1 – Hierarquia modelos de turbulência [Piccoli, 2009]

Método de simulação escolhido para este trabalho e também utilizados em alguns dos trabalhos publicados, podendo citar o trabalho do [Stangroom, 2004] e [Xiao *et al.*, 2010]. É a Simulação Numérica via Equações Médias de Reynolds – RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*). 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 e a adequação do método aos problemas analisados. A Simulação Numérica por RANS, também é conhecida como a modelagem clássica da turbulência.

A partir das equações de Navier-Stokes para escoamentos laminares, Reynolds apresentou uma abordagem estatística onde os valores de velocidade, u_j , podem ser separados em uma componente de valor médio e uma flutuação instantânea. A média desta flutuação é nula, $\overline{u'_j} = 0$.

Assim a velocidade para escoamentos turbulentos pode ser expressa por:

$$u_j = U_j + u'_j \quad (3.4)$$

A partir da Equação 3.1, de Navier-Stokes para escoamentos laminar, substitui-se o termo de velocidade pelas suas componentes para o escoamento turbulento:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3.5)$$

Reorganizando:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.6)$$

O termo obtido do lado direito da expressão acima é denominado como tensor de Reynolds, definido por:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3.7)$$

A decomposição de Reynolds considera que toda variável dependente pode ser decomposta em uma parte média temporal e uma parte flutuante. A consequência imediata desta decomposição e a transformação das equações originais em equações média, é o aparecimento de um tensor adicional, conhecido como tensor de Reynolds. As tensões de Reynolds representam a recíproca dos fluxos de quantidade de movimento devido à presença das componentes flutuantes, e não as tensões propriamente ditas. Assim elas são também chamadas tensões aparentes.

Sendo o tensor simétrico, há seis novas incógnitas, fazendo necessário modelar esse tensor. Trata-se de um momento de segunda ordem, o qual apareceu devido aos processos de média e de separação de escalas utilizadas. É sempre possível gerar uma equação de transporte para esse momento de segunda ordem, porém pela mesma razão, irá aparecer um momento de terceira ordem a ser modelado. Isto é conhecido como o problema de fechamento da turbulência. Um sistema de equações que possuem mais incógnitas que equações para solucioná-las. As soluções viáveis para este tipo problema são baseadas na chamada modelagem da turbulência. [Schlichting, 1978]

Em 1877, Boussinesq sugeriu que o tensor simétrico de Reynolds fosse relacionado através de um gradiente local de velocidades médias e uma viscosidade associada às condições locais do escoamento.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8)$$

O termo de viscosidade turbulenta é um termo adicional para modelar a viscosidade em escoamentos turbulentos ($\mu_{Total} = \mu_t + \mu$).

Em 1925, Prandtl idealizou o conceito de comprimento de mistura, análogo ao caminho livre médio na teoria cinética dos gases. Considera-se um pequeno vórtice de fluido se soltando a partir de uma altura e sendo levado para uma nova altura, onde se mistura ao escoamento principal. A trajetória deste vórtice de fluido, antes que se torne parte do escoamento principal, é conhecido como comprimento de mistura. A hipótese diz que o comprimento de mistura é singular e é uma das características da intensidade de turbulência local. Pode ser função de uma posição ou da velocidade [Stangroom, 2004] e [Piccoli, 2009].

$$\mu_t = \rho C_\mu l^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (3.9)$$

A idéia deste modelo é simples, entretanto necessita o conhecimento de uma escala de comprimento, l , que somente é válida para escoamentos simples. [Stangroom, 2004]. O comprimento de mistura é a distância percorrida por um vórtice antes que ele se torne parte de um escoamento principal.

3.6.1 Modelos de uma equação

Em 1945, Ludwig Prandtl introduziu o modelo de uma equação que pode solucionar o transporte da turbulência através da solução da equação diferencial de transporte.

$$\mu_t = \rho C_\mu k^{1/2} l \quad (3.10)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{-v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3.11)$$

Onde:

$$\varepsilon = C^* \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3.12)$$

Em 1976, Hinze desenvolveu esta equação do tensor de Reynolds. Este modelo é limitado para escoamentos simples onde o comprimento de escala é conhecido. [Stangroom, 2004].

3.6.2 O modelo $k - \varepsilon$

O modelo $k - \varepsilon$ é o mais popular modelo de duas equações. Sua formulação consiste em derivar a equação para dissipação ε para encontrar aproximações adequadas para o fechamento das equações governantes. Foi proposto por Harlow e Nakayama em 1972 e implementado por Jones e Launder no mesmo ano. O termo k é definido como a energia

cinética por unidade de massa e ε é a taxa de dissipação da energia cinética. [Wilcox, 1998]. Assim o modelo $k - \varepsilon$ é o seguinte:

A viscosidade turbulenta é definida por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

Onde k e ε são obtidas através das equações de transporte. Para energia cinética turbulenta é a seguinte:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.14)$$

E para taxa de dissipação:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.15)$$

Os coeficientes de fechamento são:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92$$

$$C_\mu = 0,09$$

$$\sigma_k = 1,0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3$$

A utilização do modelo $k - \varepsilon$ não é adequada em regiões próximas à parede. Com isso, funções de parede devem ser implementadas. Este modelo é utilizado nas simulações para o caso 2 desta dissertação.

3.6.3 O modelo $k - \varepsilon$ RNG

Este modelo é uma alternativa para o uso do modelo $k - \varepsilon$ padrão visto no tópico anterior. O modelo $k - \varepsilon$ RNG foi desenvolvido por Yakhot e Orsag [1986] usando a técnica de renormalização. As equações para geração da turbulência e dissipação são as mesmas para o $k - \varepsilon$ padrão, porém a constante $C_{\varepsilon 1}$ é combinada com a função $C_{\varepsilon 1RNG}$ que é a seguinte:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_j} = (C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 1RNG}) \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.16)$$

Onde:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.17)$$

$$\eta = \left(2E_{ij} \cdot E_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.18)$$

Os coeficientes de fechamento são:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,42 - C_{\varepsilon 1RNG}$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,68$$

$$C_\mu = 0,085$$

$$\sigma_k = 0,7179$$

$$\sigma_\varepsilon = 0,7179$$

$$\eta_0 = 4,377$$

$$\beta = 0,012$$

3.6.4 O modelo $k - \omega$

Em 1942, Komogorov propôs o primeiro modelo de turbulência de duas equações. Ele escolheu a energia cinética turbulenta como um dos parâmetros da turbulência. Em 1945, Prandtl modelou a equação diferencial que governa a energia cinética turbulenta. Este segundo parâmetro é conhecido como dissipação por unidade de energia cinética turbulenta, ω , que satisfaz a equação diferencial similar ao equacionamento para k . [Wilcox, 1998].

O equacionamento matemático para ω é mais robusto que o equacionamento para ε e pode ser integrado próximo a parede sem a necessidade de adicionar funções de parede e com maiores vantagens. [Stangroom, 2004]. Assim o modelo $k - \omega$ é o seguinte:

A viscosidade turbulenta é definida por:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.19)$$

Onde k e ω são obtidas através das equações de transporte. Para energia cinética turbulenta é a seguinte:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.20)$$

E para taxa de dissipação:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.21)$$

Onde α , β , β^* e σ^* são os coeficientes de fechamento. Para maiores informações sobre o modelo $k - \omega$ ver [Wilcox, 1998].

3.6.5 O modelo $k-\omega$ SST

Os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$ apresentam algumas falhas em algumas 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 próximas as paredes, também apresenta falha em escoamentos com separação. A equação para ω apresenta sensibilidade aos valores da frequência de turbulência fora da camada limite. Isto impede que o modelo $k-\omega$ substitua o $k-\varepsilon$, mesmo que o seu desempenho seja superior na região próxima a parede. 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 $k-\omega$ e $k-\varepsilon$. [Menter *et al.*, 2003].

Este modelo apresenta um fator de mistura, F_1 , entre os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$. Ele relaciona o afastamento da superfície. Este fator F_1 varia de um, para volumes próximos a parede, e zero, para volumes mais afastados. Através da solução da equação de Poisson o cálculo deste distanciamento poderá ser feito. [Menter *et al.*, 2003] e [Wilcox, 1998].

A energia cinética turbulenta é dada por:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (3.22)$$

Onde k é a energia cinética turbulenta e μ é a viscosidade, μ_t a viscosidade turbulenta, ω a frequência de turbulência e P_k é definido como:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \rightarrow P_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho k \omega) \quad (3.23)$$

A frequência de turbulência é modelada por:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3.24)$$

A função de mistura F_1 é definida por:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (3.25)$$

Onde y é a distância mais próxima da parede, e $CD_{k\omega}$ pode ser calculado por:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega_2} k \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (3.26)$$

A viscosidade turbulenta é definida por:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (3.27)$$

Onde S é a medida invariante do tensor de deformação e F_2 é uma segunda função de mistura definida por:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (3.28)$$

Todas as demais constantes são originadas dos modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$. Assim, os valores para este modelo são:

$$\beta^* = 0,09$$

$$\alpha_1 = 5/9$$

$$\beta_1 = 3/40$$

$$\sigma_{k1} = 0,85$$

$$\sigma_{\omega1} = 0,5$$

$$\beta_2 = 0,0828$$

$$\sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega2} = 0,856$$

O modelo pode alterar a formulação através das funções de mistura F_1 e F_2 , variando de zero a um. A primeira é responsável pela variação entre as equações de transporte, e a segunda provoca a variação entre as equações de viscosidade turbulenta. [Ludwig, 2011]. Este modelo é utilizado nas simulações para os casos 1 e 3 desta dissertação.

3.7 Método de Volumes Finitos

O método de volumes finitos tem como objetivo solucionar as equações de conservação e quantidade de movimento substituindo-as por expressões algébricas aproximadas que satisfazem a conservação das propriedades em volumes elementares. [Maliska, 2004]. Ela consiste na divisão do domínio contínuo em menores volumes, onde se soluciona as equações governantes do problema de forma discreta. Assim o escoamento é governado pelas equações de Navier-Stokes. A figura abaixo pode exemplificar a transformação das equações diferenciais, definida pelo domínio D em um sistema de equações algébricas.

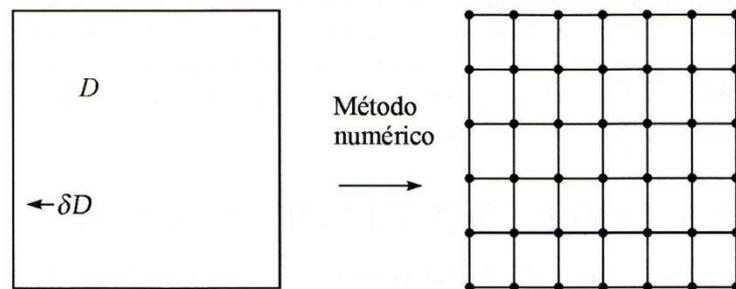


Figura 3.2 – A tarefa do método numérico [Maliska, 2004]

A Equação 3.2 da continuidade, e a equação da quantidade de movimento podem ser expressas por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j - \tau_{ij})}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_M \quad (3.29)$$

Onde S_M é o termo fonte da quantidade de movimento e p é a pressão. O tensor τ_{ij} de tensões viscosas é expresso por:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.30)$$

Onde δ_{ij} é o delta de Kronecker, μ é a viscosidade. O tensor taxa de deformação s_{ij} é definido por:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.31)$$

Por ser muito complexa, a solução analítica destas equações somente há em alguns casos muito específicos aplicando várias simplificações. [Schlichting, 1978].

3.8 Discretização do domínio

Após a definição das condições de entrada, ocorre a discretização do domínio em um determinado número de elementos e a transformação da equação diferencial parcial (EDP), que descreve o escoamento em pequenas operações algébricas que envolvem os valores das variáveis desconhecidas em cada nó do domínio. As equações governantes foram obtidas através de suas derivadas e combinações entre a velocidade e pressão. Através do processo de discretização numérica, transformam-se as EDP's em equações numéricas que podem ser programadas e calculadas. [Stangroom, 2004].

4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para alcançar os resultados desta dissertação. Inicia-se com a apresentação do problema até a análise dos resultados obtidos pela simulação. O propósito desta dissertação é analisar a aplicação da dinâmica de fluidos computacional para avaliação do potencial eólico em terrenos complexos empregando diferentes modelos e parâmetros, comparando-os com os resultados experimentais cedidos pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC. Assim pretende-se, através do uso da ferramenta computacional ANSYS-Fluent 13.0, simular o escoamento sobre uma topografia complexa com as mesmas características do modelo utilizado em túnel de vento. Esta metodologia de comparação ao modelo reduzido traz a vantagem de permitir a avaliação de um volume maior de dados, tendo em vista que o experimento em túnel de vento possibilita um maior número de pontos de medição. Ainda o experimento em laboratório permite trabalhar sob condições controladas mais adequadas quando se pretende comparar diferentes modelos e alternativas de simulação.

4.1 Apresentação do problema

Através da utilização de ferramentas computacionais para solução das equações do escoamento de ar sobre um modelo reduzido de uma topografia complexa, pode-se caracterizar o comportamento do vento utilizando a solução numérica das equações de Navier-Stokes via média de Reynolds. Desta forma emprega-se o programa comercial ANSYS Fluent 13.0 para a avaliação da metodologia de CFD por meio de uma análise dos resultados obtidos em relação aos resultados experimentais do túnel de vento.

4.2 Dados Experimentais

Os dados experimentais necessários para avaliação da metodologia de CFD foram gentilmente cedidos pelo Prof^o Dr. Acir Mércio de Loredou-Souza, diretor do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. [LAC, LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES, 2010]. Os dados foram obtidos através de ensaios experimentais realizados no Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann.

4.2.1 Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann

O Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann é um túnel de vento projetado para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Nele é possível simular as principais características de ventos naturais. 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 elétrico de 100 HP e um inversor de frequências. A Figura 4.1 ilustra a vista lateral do túnel de vento. [LAC, LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES, 2010].



Figura 4.1 – Vista lateral do Túnel de Vento Prof^o Joaquim Blessmann. [LAC, 2010]

4.2.1.1 Vento simulado

O perfil vertical de velocidades médias foi empregado respeitando a lei potencial, expressa pela Equação 2.3. Através da instalação de elementos de rugosidade na superfície interior do túnel de vento, pode-se selecionar qual o tipo de vento a ser simulado no túnel para realizar as medições experimentais. De acordo com a norma brasileira 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. No túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, foram simulados ventos com perfis de velocidade média com expoente da lei da potência variando $p = 0,11$ a $p = 0,36$. [Loredo-Souza *et al.*, 2004]. Os dados utilizados no experimento possuem o valor do expoente $p = 0,23$ que representa terrenos entre as categorias III e IV da norma NBR-6123 [1988].

4.2.1.2 Modelo Experimental

O modelo utilizado foi gerado a partir das curvas de nível do morro do Jaburu localizado no município de Vitória no Estado do Espírito Santo. As medições foram realizadas em um modelo reduzido do morro sobre o piso da do túnel de vento como se pode observar na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Modelo morro Jaburu fixado no túnel de vento [LAC, 2010]

Foram definidos nove pontos de medição onde foi verificada a velocidade e a turbulência em 20 alturas. Estes pontos podem ser observados na seção do morro ilustrados na Figura 4.3.

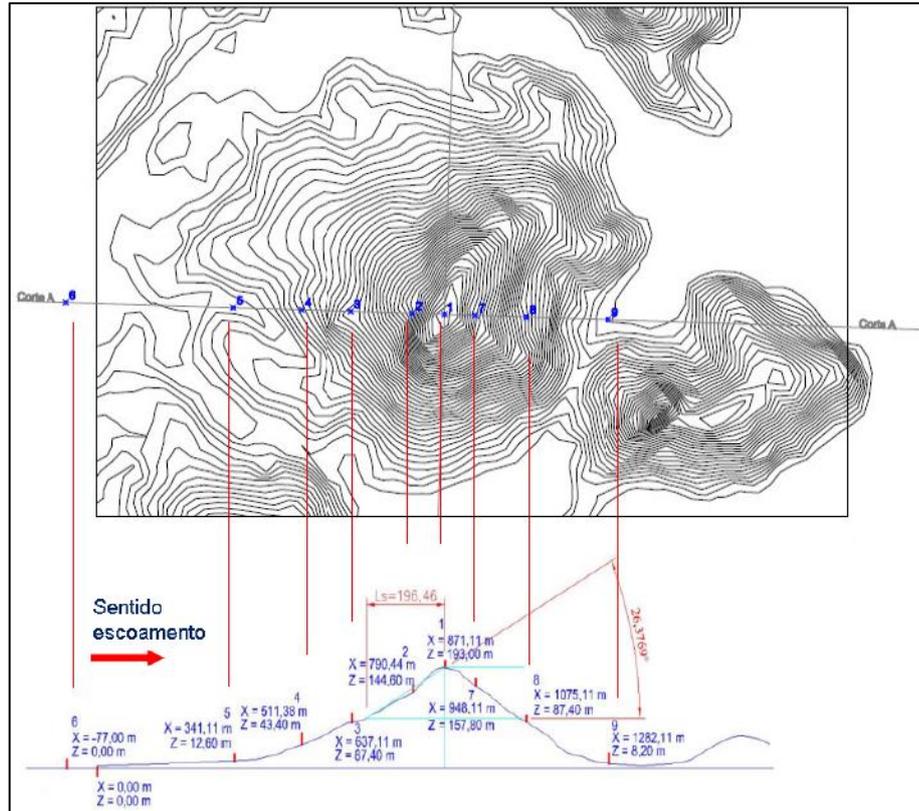


Figura 4.3 – Coordenadas dos pontos de medição [LAC, 2010]

As coordenadas dos pontos ilustradas na Figura 4.3, se encontram em escala real do morro. As coordenadas dos pontos 1 ao 9 utilizados medidos em túnel de vento são ilustradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Coordenadas da localização dos pontos de medição

	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

A medição da velocidade sobre os pontos de interesse foram obtidos com o uso de anemômetro de fio quente, o qual se baseia nas trocas de calor entre o sensor e o fluido, e assim relacionando-o com a velocidade do fluido. [Möller, 2003].

4.2.1.3 Medição dos perfis de velocidades normalizados

Na Tabela 4.2, encontram-se as medições de velocidade normalizadas sobre os pontos de interesse, considerando o perfil de vento com expoente $p = 0,23$. Durante as medições realizadas em túnel de vento, a velocidade de referência do perfil foi alterada durante medição de alguns destes pontos. Isto porque dependendo da velocidade do escoamento, pode ocorrer uma excessiva vibração na haste de fixação do anemômetro de fio quente, reduzindo a qualidades resultados medidos.

Com isso, para análise dos perfis de velocidade, elas foram normalizadas em função de uma velocidade de referência a uma cota $Z = 0,45$ metros 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 milímetros sobre o modelo. [LAC, LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES, 2010]

Tabela 4.2 – Velocidades normalizadas medidas em 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.3 Modelo Geométrico Computacional

Através das curvas de nível do terreno em questão, é possível gerar o modelo geométrico para as simulações. Assim como os dados experimentais, os dados das curvas de nível também foram disponibilizados pelo Prof^o Dr. Acir Mércio de Loredo-Souza para geração do modelo geométrico computacional.

4.3.1 Obtenção dos pontos das curvas de nível

Com a obtenção das curvas de nível, através da utilização do *software* comercial AutoCAD 2012, é possível fazer a extração das coordenadas dos pontos necessários para a geração da superfície. A figura abaixo mostra as curvas de níveis do terreno.

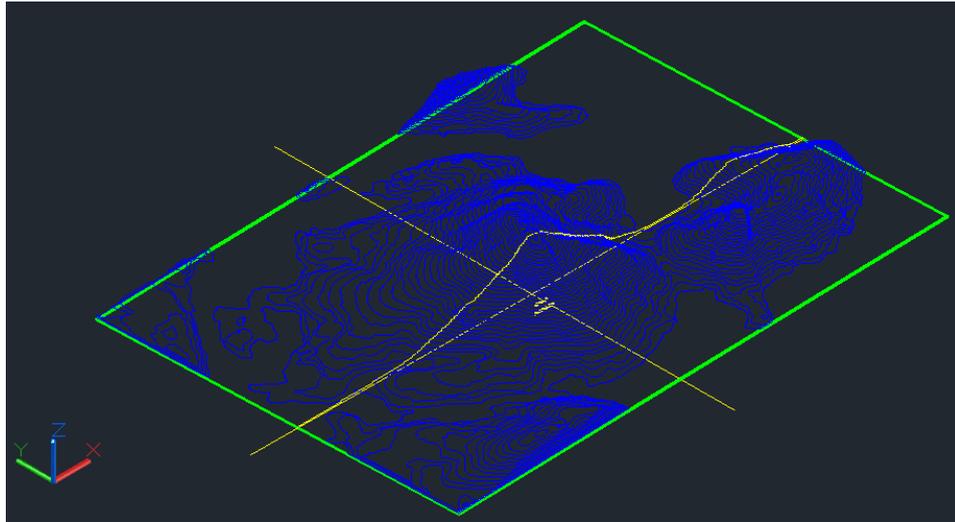


Figura 4.4 – Curvas de nível do terreno

As curvas de nível se encontram em escala real com as seguintes dimensões: 1880 metros de comprimento, 1312 metros de largura por 193 metros de altura. Para evitar que as condições de entrada e de saída possam influenciar no resultado das simulações, ou dificuldade de convergência durante as mesmas, optou-se em aumentar o comprimento do domínio. Assim a entrada do domínio foi deslocada em 200 metros, e a saída 940 metros. Com isso, o novo comprimento domínio passará a ter 3020 metros de comprimento.

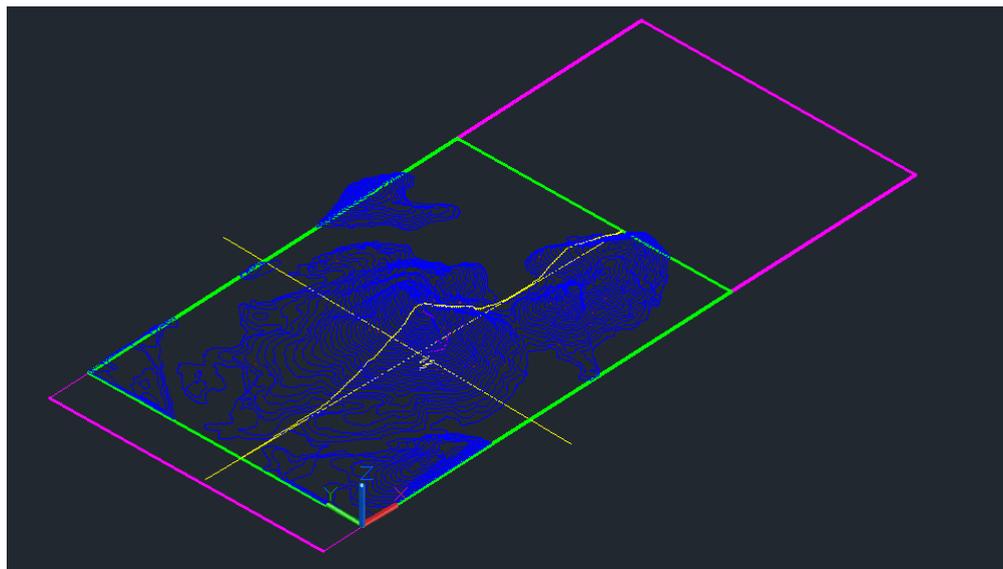


Figura 4.5 – Região do domínio

Na Figura 4.5 é ilustrada, através das linhas lilás, a nova região que abrange o domínio a ser estudado.

Sobre cada curva são marcados pontos espaçados a cada 50 metros, onde foram extraídas as coordenadas de 13312 pontos sobre as curvas de nível. Faz-se necessário alterar a escala para o modelo reduzido empregado no túnel de vento. As dimensões do domínio computacional utilizado para as simulações possuem 2,99 metros de comprimento, 1,3 metros de largura e 0,9 metros de altura. Os pontos obtidos são salvos em um arquivo de formato ASCII necessários para geração da superfície, onde apresentam as coordenadas geográficas de cada ponto.

4.3.2 Triangularização dos pontos da superfície

Nesta fase para geração da superfície, é necessária a utilização do *software* de distribuição gratuita Topocal 2.0, o qual é uma ferramenta computacional eficiente em cálculos topográficos e modelagens de terreno através triangularizações de pontos geométricos. Com o uso desta ferramenta também é possível exportar o modelo gerado para outras ferramentas de CAD.

Através dos pontos extraídos, o Topocal 2.0 faz-se a ligação dos pontos gerando pequenos triângulos que fazem parte da superfície. Após a geração da superfície, o modelo é exportado novamente para o formato DXF/DWG ilustrado na Figura 4.6.

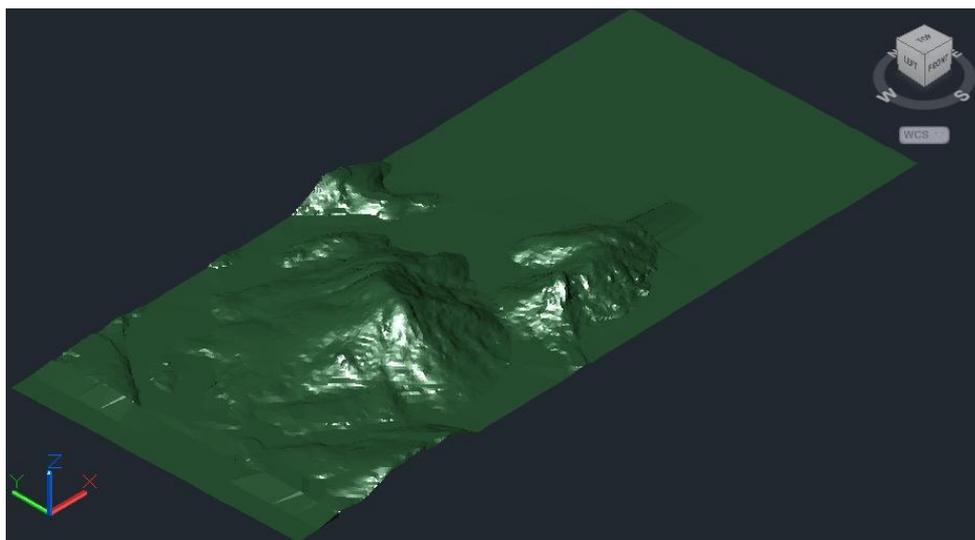


Figura 4.6 – Superfície Gerada no *software* Topocal 2.0

A superfície gerada, ilustrada, será utilizada para a discretização do domínio computacional descrita no próximo tópico.

4.4 Discretização

O domínio computacional é discretizado em volumes finitos. Para isso foi utilizado o programa comercial ANSYS-ICEM 13.0 como ferramenta de geração de malhas, que serão utilizadas nas simulações deste trabalho.

A discretização é feita em volumes finitos hexaédricos com refinamento controlado do seu tamanho próximo a superfície do morro. Para a discretização foram criadas 5 malhas variando o número de volumes, com o objetivo de avaliar a qualidade entre elas, onde apenas uma delas será utilizada para as simulações. No capítulo 5 haverá uma discussão referente à qualidade de malha e a seleção da mesma para as simulações.

As dimensões do domínio, as quais representam as dimensões do túnel de vento, que possuem 2,99 metros de comprimento, 0,9 metros de altura e 1,3 metros de largura. Assim o domínio são discretizados conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características de divisão do domínio computacional

	Elementos X	Elementos Y	Elementos Z	Nº de Volumes
Malha 1	110	60	40	250809
Malha 2	110	90	70	669369
Malha 3	110	120	100	1284129
Malha 4	110	150	130	2145000
Malha 5	111	150	150	2497500

A divisão dos elementos na direção X e Y são uniformes. Entretanto a divisão dos elementos na direção Z é dividida com um refinamento controlado próxima à superfície. O espaçamento da menor divisão possui 0,001 metros de altura e o crescimento dos mesmos são regidos por uma função exponencial. Na Figura 4.7 pode ser observado o refinamento da malha próxima à superfície.

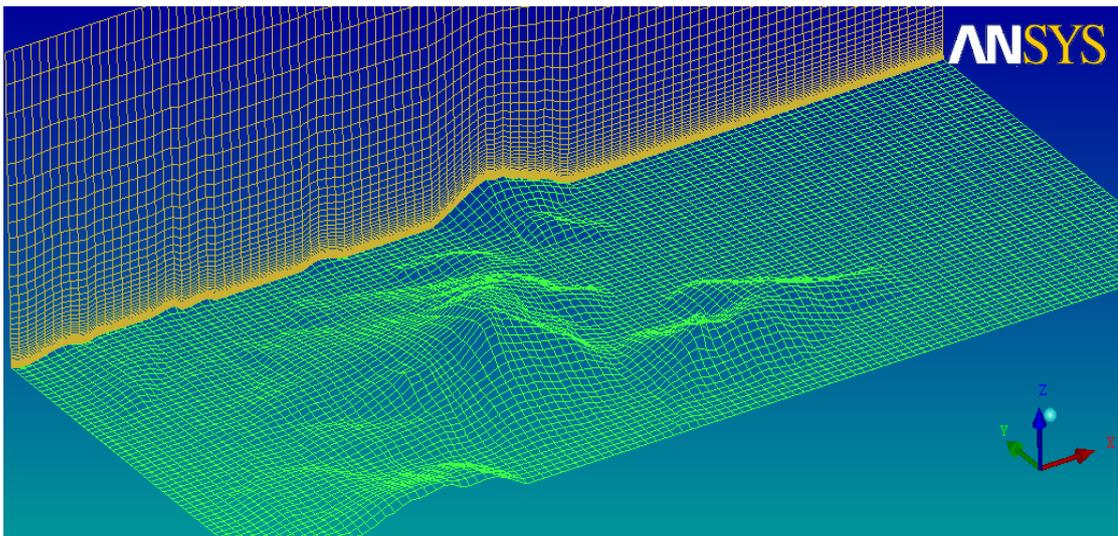


Figura 4.7 – Malha gerada sobre à superfície

A Figura 4.8 ilustra o domínio computacional discretizado em volumes finitos.

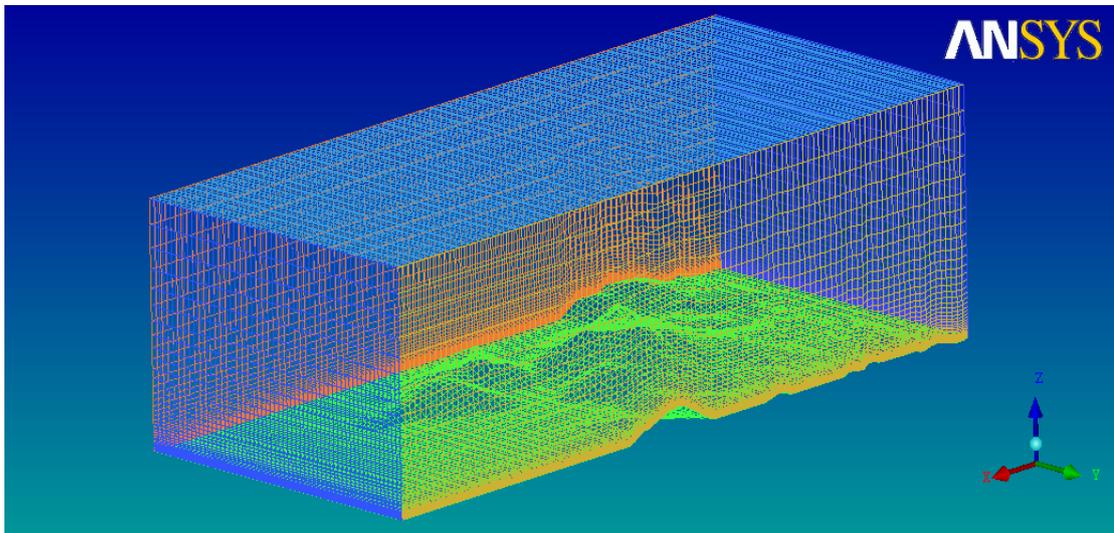


Figura 4.8 – Domínio computacional discretizado

4.5 Condições Iniciais e de Contorno

O comportamento do escoamento no interior do domínio é influenciado pelas condições iniciais e pelas condições de contorno. Para a obtenção de resultados satisfatórios, necessita-se que estas condições sejam aplicadas em conformidade com a física do problema em estudo.

A entrada do domínio é descrita por um perfil de velocidades que representa a CLA. A saída do domínio considera-se um fluxo livre e as laterais e os planos inferior e superior consideram-se paredes impermeáveis sem deslizamento. A Figura 4.9 ilustra as condições iniciais e de contorno do problema e serão detalhadas nos próximos tópicos.

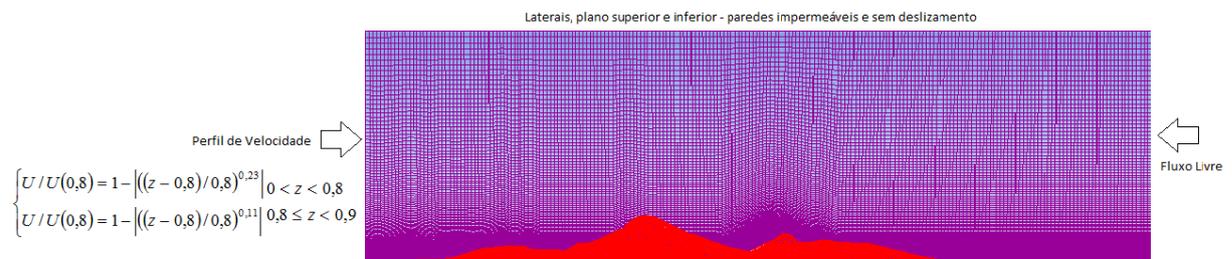


Figura 4.9 – Domínio computacional e condições de contorno para as simulações

4.5.1 Condições iniciais

Com o objetivo de representar a fidelidade do escoamento durante a fase de medição dos dados experimentais, não se admite uma velocidade uniforme de entrada, mas sim um perfil de velocidades com as mesmas características que as utilizadas nas durante as medições em túnel de vento, de maneira que possam reproduzir o escoamento e possibilitar os cálculos mais próximos aos dados experimentais.

Para a avaliação da qualidade de malha, que será apresentada no próximo capítulo, necessita-se fazer um estudo preliminar. Para esta avaliação será utilizada uma velocidade média de entrada na entrada do domínio.

4.5.2 Condições de entrada

Para reprodução do perfil de vento na entrada do túnel de vento, seleciona-se a opção (*velocity-inlet*) do ANSYS-Fluent 13.0, que considera como condição de entrada uma velocidade prescrita nas direções x, y e z. Nas direções y e z as velocidades são nulas. Na direção x, tem-se como objetivo simular o perfil de vento, isto é, a aplicação da velocidade variável com a altura do domínio. Assim através de uma UDF (*User-Defined Function*) o programa ANSYS-Fluent 13.0 permite inserir uma função que representa o perfil de velocidades.

De acordo com os dados experimentais cedidos pelo LAC, o expoente da lei da potência para o perfil de velocidade possui o valor de $p = 0,23$. Porém, somente a parte inferior do túnel simula a CLA através da utilização de elementos de rugosidade. [Loredo-Souza *et al.*, 2004]. Para a região próxima à superfície superior o expoente do perfil de velocidade será estipulado no valor de $p = 0,11$, que se aproxima um perfil gerado sem elementos de rugosidade. Esta distância é de aproximadamente de 100 milímetros próxima à superfície superior do túnel de vento.

Assim, a condição de entrada pode ser descrita pelo seguinte perfil de velocidade adaptada da Equação 2.3.

$$\begin{cases} U/U(0,8) = 1 - \left| \left((z - 0,8)/0,8 \right)^{0,23} \right| & 0 < z < 0,8 \\ U/U(0,8) = 1 - \left| \left((z - 0,8)/0,8 \right)^{0,11} \right| & 0,8 \leq z < 0,9 \end{cases} \quad (4.1)$$

Uma função UDF, é uma função programável que pode ser carregada dinamicamente com o ANSYS-Fluent 13.0. O código fonte de uma UDF são escritos em linguagem de programação C e podem ser editados facilmente em qualquer editor de textos. [Ansys, 2009]. O código fonte utilizado para reproduzir o perfil de velocidade na entrada do domínio é encontrado no anexo desta dissertação.

Para o tratamento da turbulência, foram considerados dois parâmetros, a intensidade de turbulência e o diâmetro hidráulico. O diâmetro hidráulico é uma relação empírica que pode ser empregada em cálculos em dutos de seção transversal não circular. [Fox e McDonald, 2001]. Em uma seção retangular o diâmetro hidráulico é definido como:

$$D_h = \frac{4bh}{2(b+h)} \quad (4.2)$$

Onde b representa a largura do túnel de vento e h a sua respectiva altura. Desta forma os parâmetros para o tratamento da turbulência, foram considerados uma intensidade média de turbulência de 10% e o diâmetro hidráulico de 1,06 metros para a seção do túnel de vento.

4.5.3 Condições de saída

Como condição de saída do túnel de vento, foi selecionada a opção de fluxo livre (*outflow*) do programa ANSYS-Fluent 13.0. Esta opção é utilizada quando na saída do domínio as informações sobre velocidade e pressão não são conhecidos antes da solução do problema. [Ansys, 2009].

4.5.4 Condições de parede

Para as laterais e para o teto do túnel de vento foi escolhida a opção de parede (*wall*) do programa, a qual é possível selecionar as características da parede como rugosidade e deslizamento. A reprodução das paredes do túnel é imposta uma condição de não deslizamento e uma rugosidade prescrita estipulada para madeira, que é o material das paredes internas do túnel. O valor da rugosidade para madeira é de 0,0009 metros. [Fox e McDonald, 2001].

4.5.5 Condições de solo

Para as características do solo deve-se ter uma maior atenção, pois é onde é representada a superfície do terreno. É escolhida a condição de parede (*wall*) para o solo, e quanto a sua rugosidade serão analisados dois casos. Um caso considerando que a superfície da geometria não possua rugosidade superficial, pois não há informações suficientes para determinar a rugosidade do modelo. Também um caso que considera um modelo de superfície com uma rugosidade estipulada em 5 milímetros, que representa a mesma dimensão da espessura das camadas utilizadas na construção do modelo reduzido.

4.6 Simulação Numérica

Neste trabalho a simulação numérica tem como objetivo avaliar o comportamento do vento em terrenos complexos. Assim, a análise numérica computacional é baseada nas equações de Navier-Stokes via Média de Reynolds e no método de Volumes Finitos. Utiliza-se uma simulação em regime permanente, sem transferência de calor e também se considera que o escoamento seja incompressível.

Para solução do problema, serão utilizados dois modelos de turbulência, dentre os quais foram mencionados no capítulo 3. Primeiramente o modelo $k - \varepsilon$, expresso pelas Equações 3.13 até 3.15, que embora não seja indicado para escoamento sobre superfícies curvas é o modelo que alguns programas computacionais de prognósticos de energia eólica utilizam. Também utilizou o modelo $k - \omega$ SST, expresso pelas Equações 3.22 até 3.28 que consegue amenizar as falhas de descolamento da camada limite que ocorre com a utilização do modelo $k - \varepsilon$. [Wilcox, 1998]

O esquema para o acoplamento pressão-velocidade é o SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*), desenvolvido por Patankar e Spalding, 1972 [Wilcox, 1998], e a discretização espacial utilizou-se *Upwind* de segunda ordem. O critério de convergência é fixado em 1×10^{-5} . O fluido de trabalho é considerado ar padrão à 25°C. Para maiores informações sobre o acoplamento pressão-velocidade, verificar no Terory Guide do programa ANSYS-Fluent. [Ansys, 2009].

4.6.1 Recurso computacional

Com o objetivo de descrever totalmente as técnicas utilizadas para a obtenção dos resultados satisfatórios, é importante declarar o equipamento utilizado.

Todas as simulações deste trabalho foram realizadas com o apoio do CESUP, Centro Nacional de Supercomputação da UFRGS. O Cluster Sun Fire disponibilizado pelo CESUP para as simulações possui 28 estações Sun Fire X2200+ (cada com 2 processadores Quad-Core AMD Opteron 2.2 GHz, 16 GB RAM) com performance de 1,97 TFlops; 6 estações Sun Fire X2200 (cada com 2 processadores Dual-Core AMD Opteron 1.8 GHz, 8 GB RAM) com performance de 173 GFlops; 6 estações Sun Fire X4600 (cada com 8 processadores Quad-Core AMD Opteron 2.3 GHz, 128 GB RAM) com performance de 1,77 TFlops; 1 GPU AMD Firestream com performance de 500 GFlops; 8 GPU nVidia Tesla com performance conjugada de 8,28 TFlops; 1 Data Server Sun Fire X4500 com capacidade de 48 TB; 2 Sun Storage Arrays com capacidade total de 36 TB; switch InfiniBand Voltaire ISR9288 de 288 portas. [Meira e Fernandez, 2011].

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações realizadas conforme a metodologia descrita no capítulo 4. O estudo do comportamento do vento sobre terrenos complexos conforme descrito é analisado utilizando um perfil de velocidades variável em função da altura, conforme descrito no item 4.5.2. Com o objetivo de alcançar a mesma condição, através da utilização da lei da potência, expressa pela Equação 4.1, calcula-se o perfil de velocidades na entrada do domínio. A velocidade de referência de entrada é de 14 m/s para uma altura $Z = 800$ mm e a intensidade de turbulência aproximada em 10%.

Para efeitos de comparação, os resultados obtidos através da simulação numérica e os dados experimentais do LAC são apresentados graficamente focados nos perfis de velocidade sobre cada um dos nove pontos de interesse localizados na diretriz principal do modelo. As velocidades são normalizadas por uma velocidade de referência $U(z_{ref})$, que se refere à velocidade do escoamento para uma cota $Z = 450$ mm sobre os pontos de interesse. A velocidade de referência é de $U(z_{ref}) = 12,5$ m/s.

Os resultados são divididos em três casos. O caso 1 se refere à simulação do escoamento de ar sobre o terreno utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST negligenciando o comprimento de rugosidade. O caso 2 diz respeito à simulação do escoamento de ar sobre o terreno utilizando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ considerando o comprimento de rugosidade de 0,005 metros. Por fim, o caso 3 se refere à simulação do escoamento de ar sobre o terreno através da utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST considerando o comprimento de rugosidade de 0,005 metros.

A estimativa entre os resultados obtidos através de simulação numérica e os dados experimentais cedidos pelo LAC são ilustrados em figuras com os perfis de velocidade obtidos em cada um dos casos simulados e os dados experimentais. O pós-processamento dos dados resultantes das simulações é realizado utilizando a ferramenta computacional ANSYS-Fluent 13.0. O estudo da qualidade de malha é feita através da observação da vazão mássica que atravessa a saída do domínio em função do número de volumes de cada malha. São analisados os resultados para os três casos apresentados, mostrando o fluxo sobre a superfície do domínio e o escoamento sobre cada ponto de interesse.

5.1 Avaliação da qualidade de malha

A qualidade de malha utilizada na discretização do domínio de cálculo está diretamente relacionada com os resultados obtidos durante as simulações. Desta forma, a análise da qualidade de malha tem como objetivo avaliar o comportamento numérico de uma variável de acordo com o nível de refinamento para determinação da malha de trabalho.

Para a avaliação da qualidade de malha as condições iniciais, condições de saída e condições de parede, possuem o mesmo tratamento que descrito no item 4.5, exceto a condição de entrada. Como o objetivo destas simulações é avaliar o efeito da malha nos resultados das simulações, a condição de entrada é avaliada a partir de uma velocidade média, ao invés de um perfil conforme foi descrito no item 4.5.2. Assim, considera-se uma velocidade média de entrada de 25 m/s.

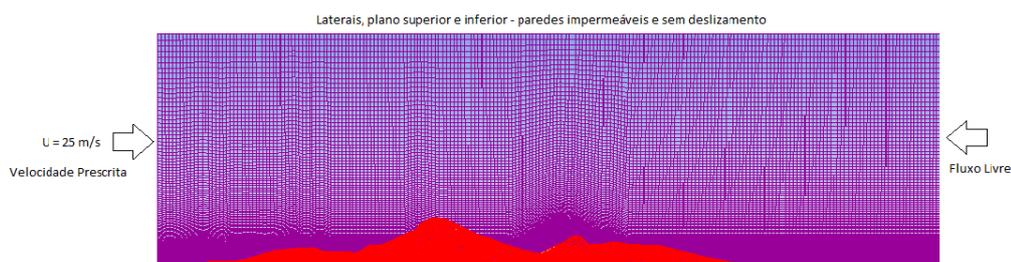


Figura 5.1 – Domínio computacional e condições de contorno para avaliação da malha

Foram realizadas simulações, em regime permanente, em cinco malhas com variação do número de volumes. A avaliação da qualidade de malha é feita através dos resultados obtidos em uma região do problema. A região escolhida para avaliação da qualidade de malha é a vazão mássica de ar que escoava através da saída do domínio. O modelo de turbulência utilizado para avaliação da qualidade de malha foi o modelo $k-\omega$ SST, o critério de convergência fixado em 1×10^{-5} e para a discretização espacial utilizou-se *Upwind* de segunda ordem. Os resultados alcançados durante a avaliação da qualidade de malha estão ilustrados na Tabela 5.1. A variação da vazão mássica ar é calculada a partir da diferença entre os valores encontrados. A escolha da malha mais refinada permite que os resultados sejam obtidos em pontos mais próximos aos pontos de medição.

Tabela 5.1 – Avaliação das Malhas

	Nº de Volumes	Vazão mássica (kg/s)	Variação (%)
Malha 1	250809	35,863264	-
Malha 2	669369	35,864232	0,0027
Malha 3	1284129	35,865099	0,0024
Malha 4	2145000	35,865924	0,0023
Malha 5	2497500	35,865924	0,0000

Com base nos resultados obtidos na avaliação da qualidade de malha, pode-se observar que entre as malhas 4 e 5 não houve variação no valor da vazão mássica de ar na saída do domínio. Optou-se pela utilização da Malha 5, que possui aproximadamente 2,5 milhões de volumes e um melhor refinamento próximo à superfície.

5.2 Caso 1 - escoamento sobre a superfície sem rugosidade com $k - \omega$ SST

Neste primeiro caso, se refere ao estudo do escoamento sobre o modelo sem o efeito da rugosidade superficial. Os resultados são obtidos através de simulação numérica com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST. A Figura 5.2 ilustra os vetores de velocidade sobre cada um dos pontos avaliados.

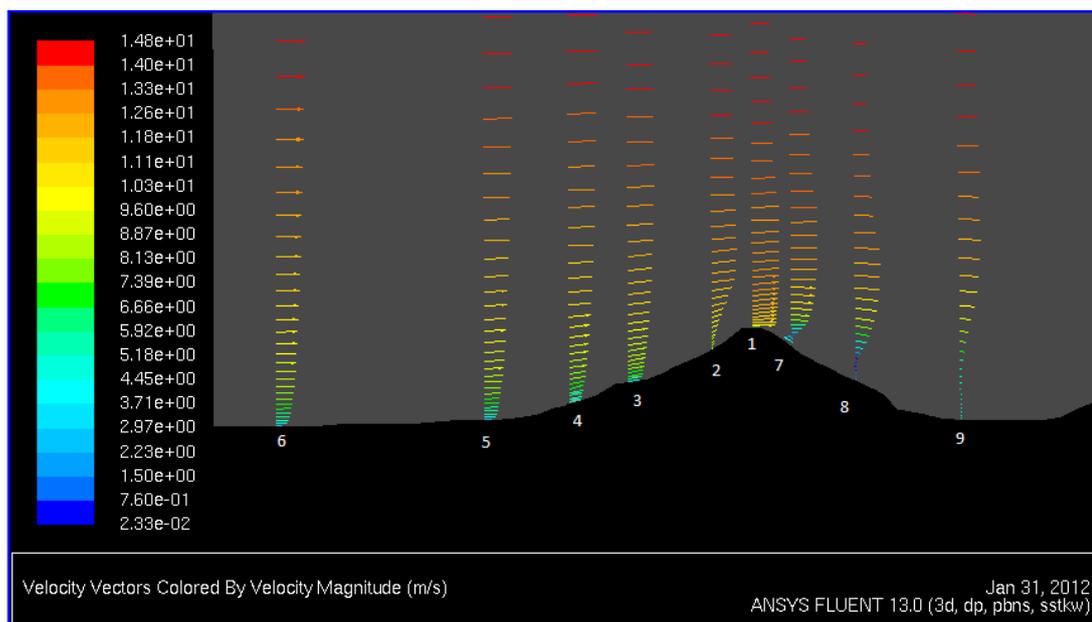


Figura 5.2 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 1

Observa-se que na região do ponto 1, há uma aumento da velocidade próximo à superfície e nos pontos 7, 8 e 9, verifica-se uma redução da velocidade devido à presença um ponto de inflexão. Este é ocasionado pelo gradiente adverso de pressão, resultando em uma região de deslocamento da camada limite, usualmente descrita como região de recirculação.

Através de recursos de pós-processamento da ferramenta computacional ANSYS-Fluent 13.0, é possível mapear o campo de velocidades sobre a superfície em estudo. Os campos de velocidades são ilustrados na diretriz principal do morro, onde estão localizados os pontos acima mencionados. A diretriz principal é ilustrada no corte AA da Figura 4.3. A Figura 5.3, ilustra o campo de velocidades na diretriz principal para o caso 1 sobre os pontos de interesse.

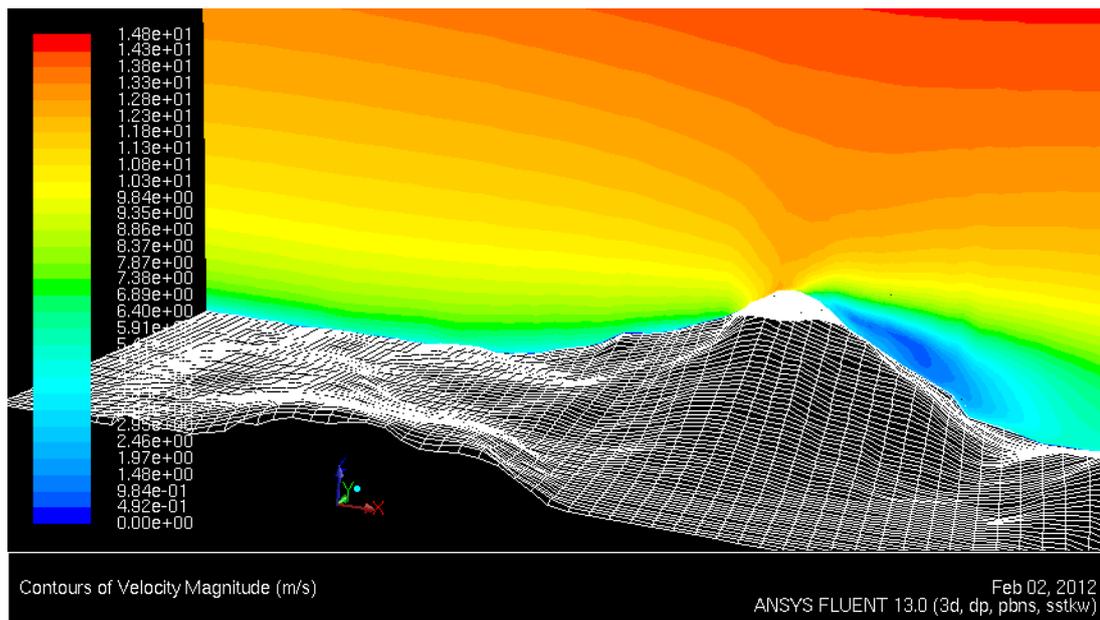


Figura 5.3 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 1

Observa-se que na região dos pontos 3, 4, 5 e 6, o campo de velocidades permanece praticamente uniforme, com dificuldade de destacar estas variações.

No ponto 2, região que se aproxima do topo do morro, pode-se observar um aumento da magnitude da velocidade devido à aproximação das linhas de corrente e conseqüente aumento da velocidade próxima a superfície. No topo do morro, onde se localiza o ponto 1, percebe-se mais claramente na figura uma região onde as velocidades próximas à superfície apresentam uma maior magnitude, pois é onde que as linhas de corrente ficam mais próximas. Também observa-se uma região sobre os pontos 7,8 e 9 onde ocorre a redução das velocidades próximas à superfície.

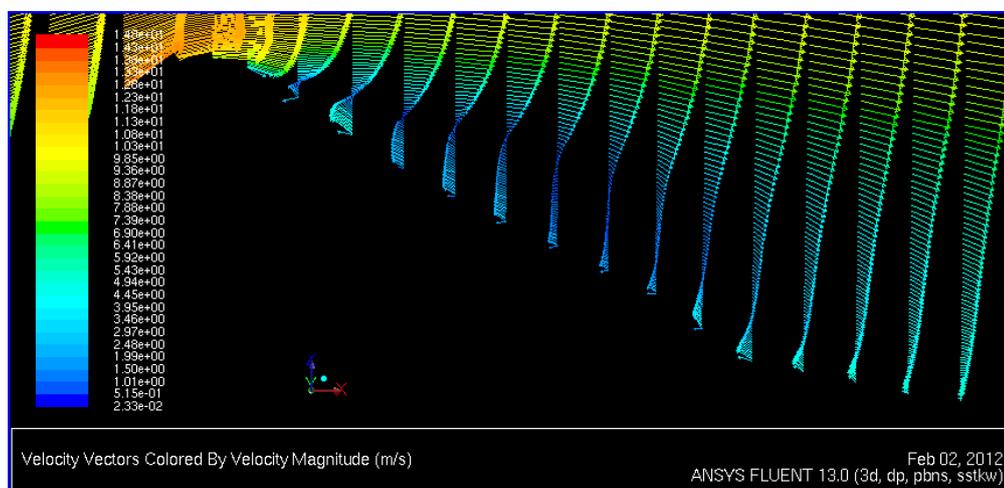


Figura 5.4 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 1

Na Figura 5.4 pode-se observar a separação da camada limite e a presença de um escoamento reverso ocasionado pelo gradiente adverso de pressão.

5.3 Caso 2 - Escoamento sobre a superfície com rugosidade com $k - \varepsilon$

O segundo caso é referente ao estudo do escoamento sobre o modelo com o efeito da rugosidade superficial. Os resultados são obtidos através de simulação numérica com o a utilização do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ considerando uma rugosidade superficial de 5 milímetros. A Figura 5.5 ilustra os vetores de velocidade sobre cada um dos pontos avaliados.

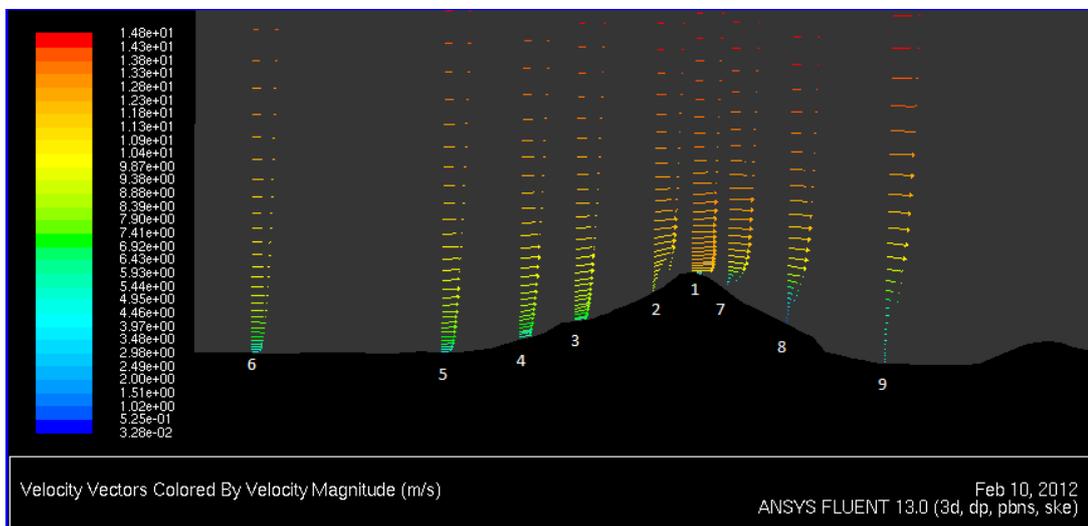


Figura 5.5 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 2

Também observa-se que na região do ponto 1, há uma aumento da velocidade e nos pontos 7, 8 e 9, onde há redução da velocidade devido à presença um ponto de inflexão ocasionado pelo gradiente adverso de pressão, fazendo com que possa apresentar uma região com a presença de recirculação.

Assim como no caso 1, a Figura 5.6 ilustra o campo de velocidades sobre os pontos localizados na diretriz principal do morro.

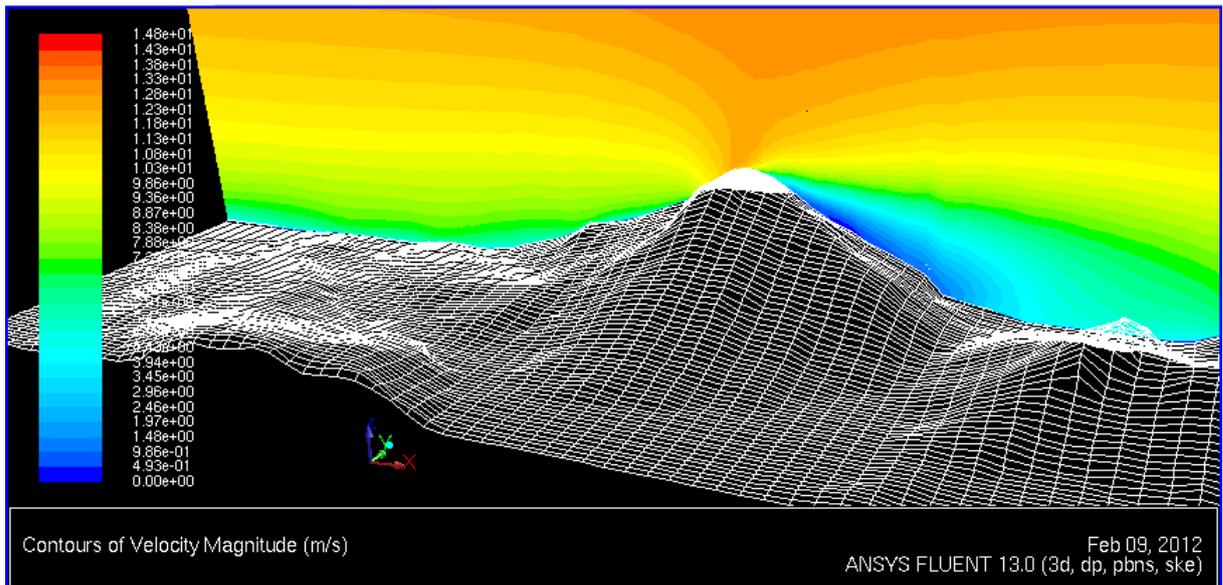


Figura 5.6 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 2

Para o caso 2, pode-se observar que na região dos pontos 3, 4, 5 e 6, o campo de velocidades apresenta uma pequena variação. No ponto 2, região que se aproxima do topo do morro, também observa-se um aumento da magnitude da velocidade devido à aproximação das linhas de corrente e conseqüente aumento da velocidade próxima a superfície. No ponto 1, percebe-se uma região onde as velocidades próximas à superfície apresentam uma maior magnitude pois é onde as linhas de corrente ficam mais próximas. Observa-se também uma região sobre os pontos 7,8 e 9 onde ocorre a redução das velocidades próximas à superfície. Entretanto é importante salientar que o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ não é o modelo de turbulência mais indicado para análise em superfícies curvas.

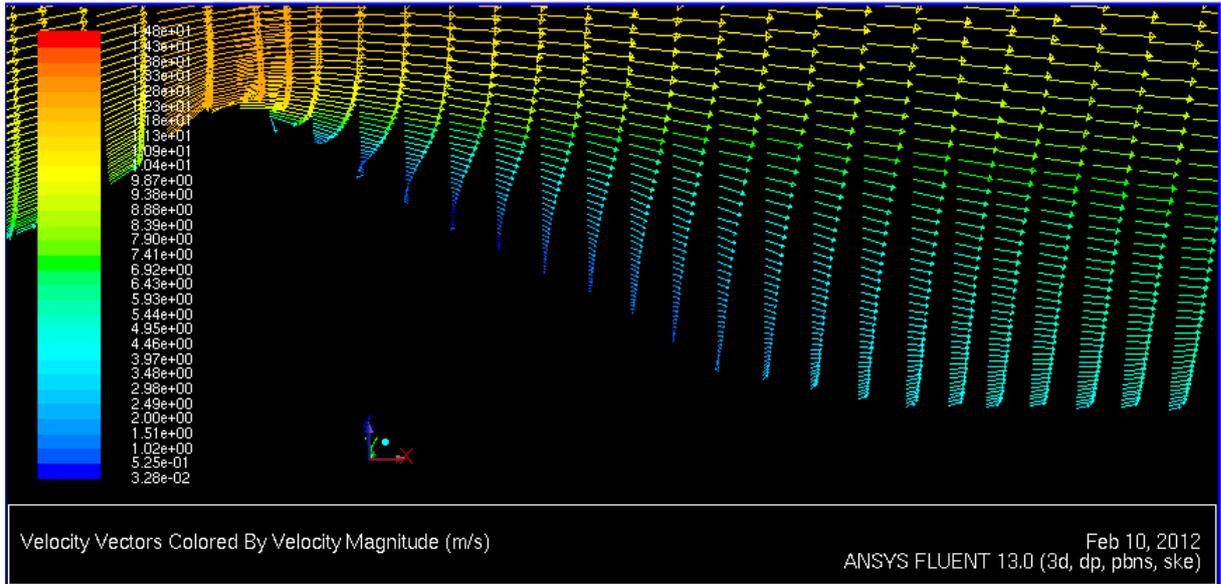


Figura 5.7 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 2

Ao contrário ao que foi observado no caso 1, na Figura 5.4 não se pode observar a separação da camada limite e a presença de um escoamento reverso ocasionado pelo gradiente adverso de pressão.

5.4 Caso 3 - Escoamento sobre a superfície com rugosidade com $k - \omega$ SST

Este último caso é referente ao estudo do escoamento sobre o modelo com o efeito da rugosidade superficial. Os resultados são obtidos através de simulação numérica com a utilização do modelo de turbulência $k - \omega$ SST. A Figura 5.8 ilustra os vetores de velocidade sobre cada um dos pontos avaliados.

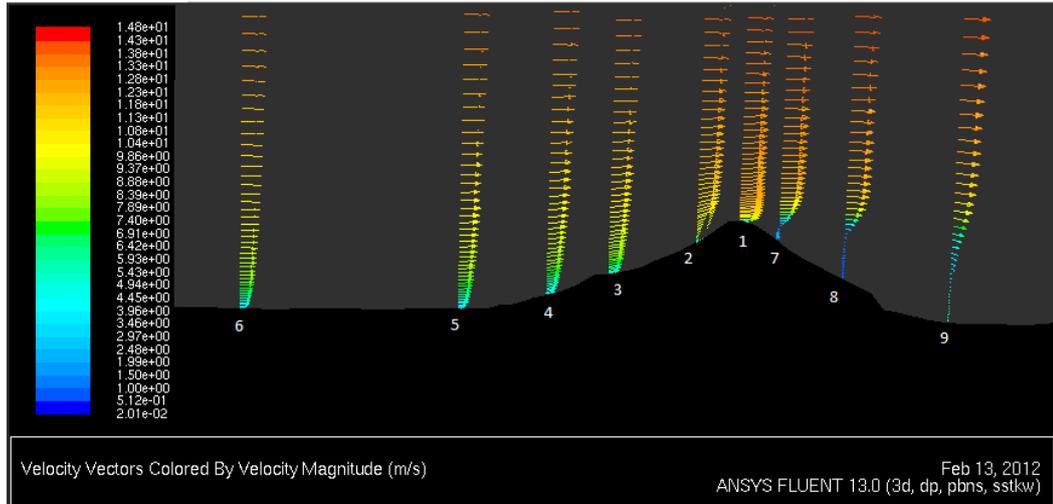


Figura 5.8 – Vetores de Velocidade sobre os pontos para o caso 3

Como nos casos anteriores, observa-se também que na região do ponto 1 há um aumento da velocidade, e nos pontos 7 e 8 há redução da velocidade com a presença um ponto de inflexão ocasionado pelo gradiente adverso de pressão.

A Figura 5.9 ilustra o campo de velocidades sobre os pontos localizados na diretriz principal do morro.

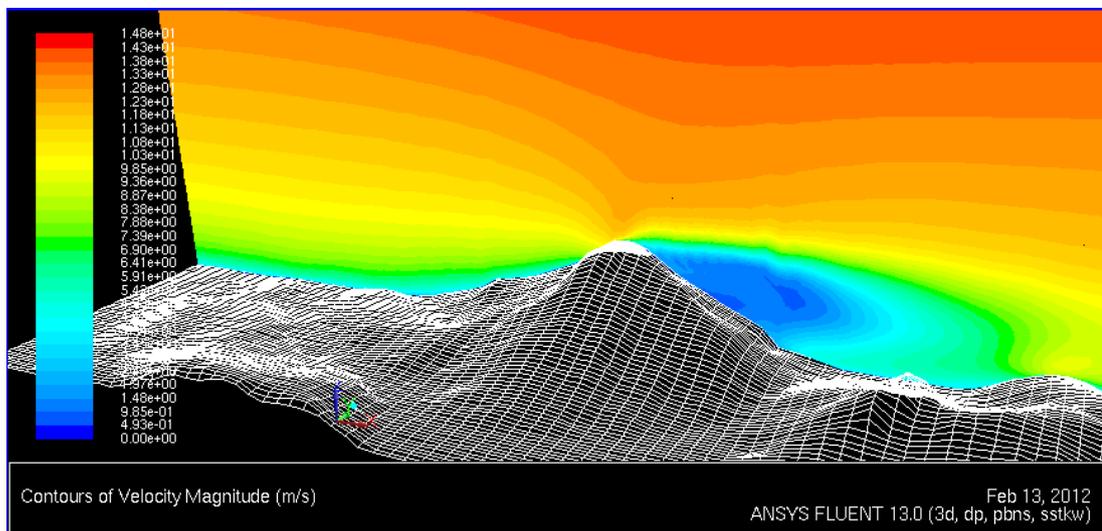


Figura 5.9 – Campo de Velocidade na diretriz principal para o caso 3

Para o caso 3, sobre os pontos de interesse, pode-se observar que na região dos pontos 3, 4, 5 e 6, o campo de velocidades apresenta uma pequena variação. No ponto 1, também nota-se uma região onde as velocidades próximas à superfície apresentam uma maior

magnitude pois é onde as linhas de corrente se aproximam. Observa-se também que sobre os pontos 7,8 e 9 a área afetada, onde ocorre a redução das velocidades, é maior que os casos anteriores.

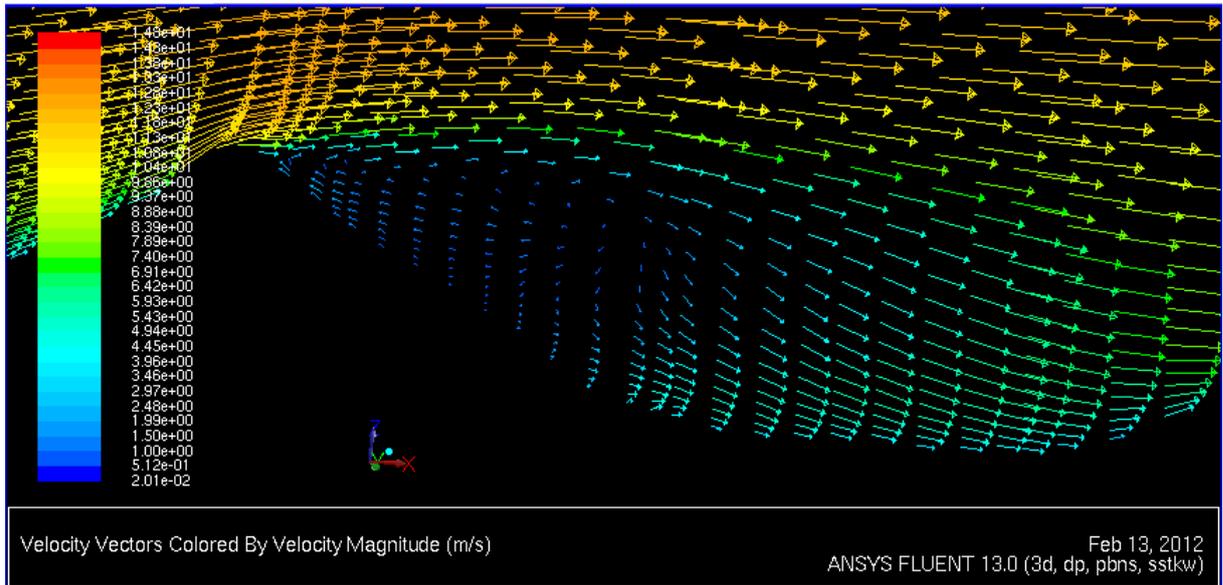


Figura 5.10 – Vetores velocidade sobre os pontos 7, 8 e 9 para o caso 3

Na Figura 5.10 pode-se notar de forma mais clara a presença de uma região circulação do escoamento sobre a superfície ocasionada pelo descolamento da camada limite.

5.5 Comparação dos casos avaliados

5.5.1 Perfil de velocidades sobre o ponto 1

O ponto 1 está localizado sobre o ponto mais alto da geometria. Sobre ele são apresentados os perfis de velocidades obtidos através de ensaios experimentais em túnel de vento e através de simulações numéricas com o uso de CFD.

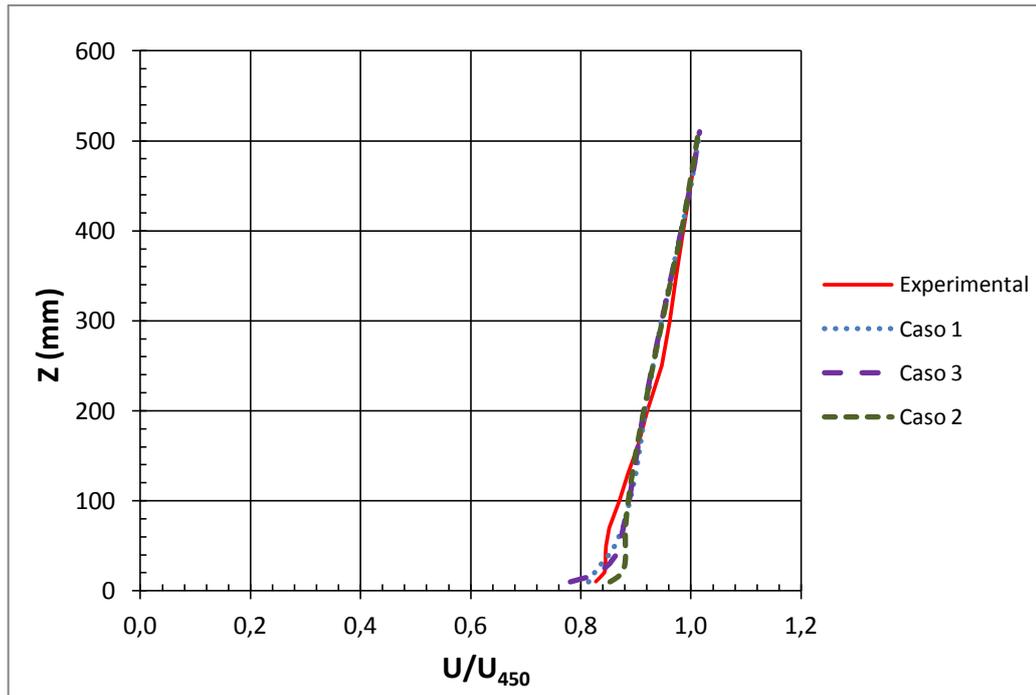


Figura 5.11 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 1

Na Figura 5.11, pode-se observar uma boa coerência entre os resultados numéricos com os experimentais. Percebe-se uma aceleração do escoamento próxima à superfície.

5.5.2 Perfil de velocidades sobre o ponto 2

Conforme pode ser observado na Figura 5.4, o ponto 2 está localizado entre os pontos 1 e 3. Assim como o primeiro perfil, os resultados alcançados por simulação numérica apresentam uma coerência com os resultados obtidos através de ensaio experimental em túnel de vento conforme pode ser observado na Figura 5.12.

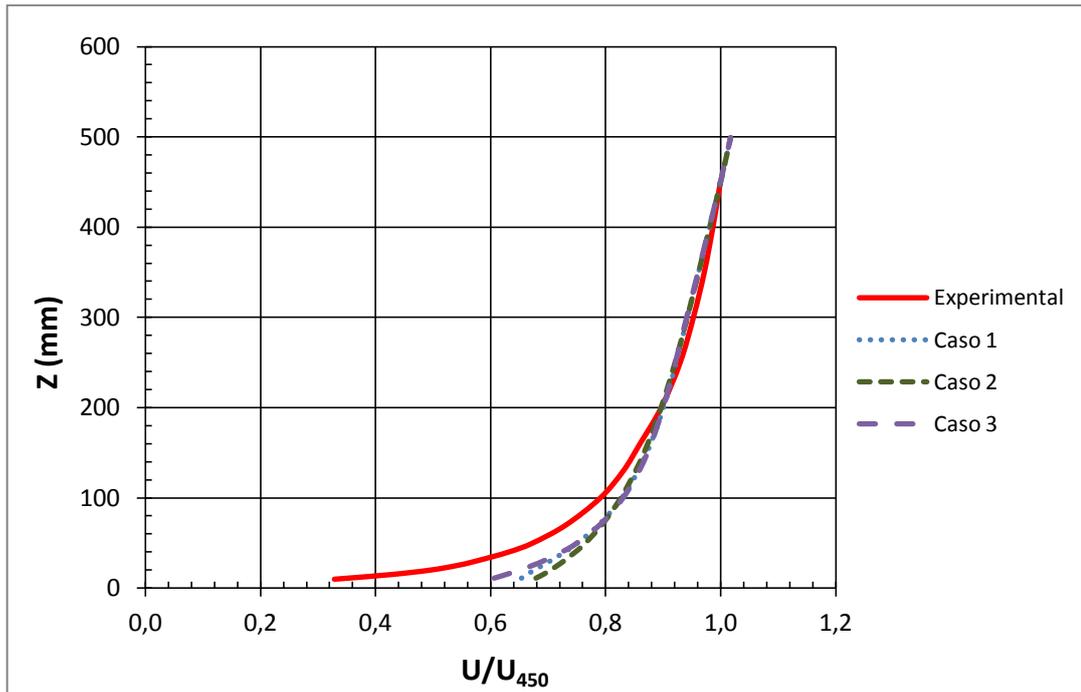


Figura 5.12 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 2

Entretanto os valores da velocidade obtida através da simulação numérica para alturas inferiores a 200 milímetros estão superestimados em relação aos dados experimentais em túnel de vento. Os resultados da simulação que mais se aproximam aos dados experimentais, são referentes ao caso 3, onde se utilizou o modelo de turbulência $k - \omega$ SST com rugosidade superficial de 5 milímetros.

5.5.3 Perfil de velocidades sobre o ponto 3

O ponto 3 está compreendido entre os pontos 2 e 4. Como já foi observado no ponto 2, o perfil de velocidades também são coerentes com os dados experimentais.

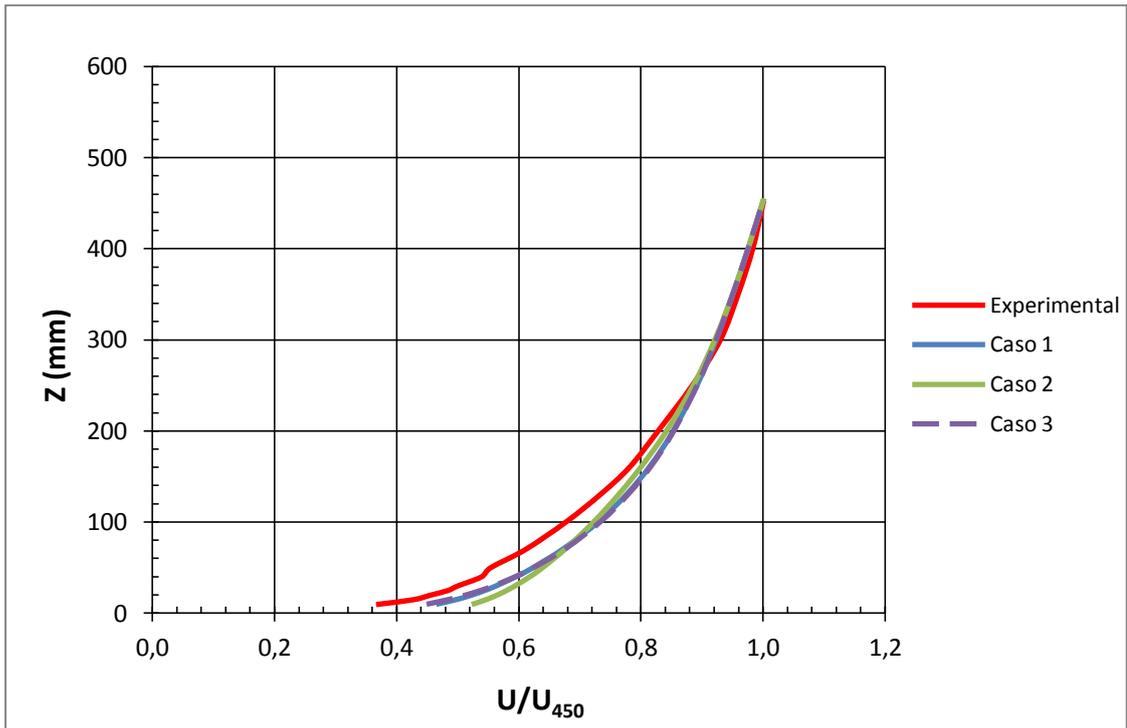


Figura 5.13 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 3

Assim como já foi observado nos perfis de velocidade sobre o ponto 2, Na Figura 5.13 também observa-se que os valores de velocidade obtidos através de simulação numérica, embora próximas, estão ligeiramente superestimados em relação aos dados experimentais

5.5.4 Perfil de velocidades sobre o ponto 4

A Figura 5.14 ilustra os perfis de velocidade obtidos por simulação numérica e através de ensaios experimentais para o ponto 4. Está localizado entre os pontos 3 e 5 da diretriz principal do morro.

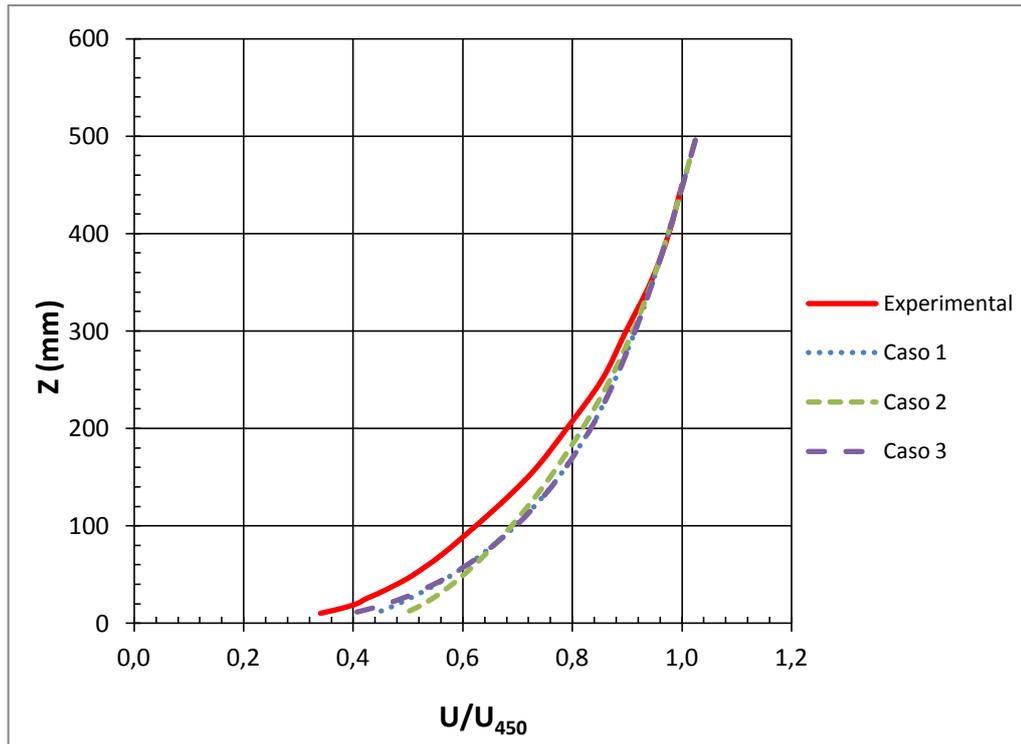


Figura 5.14 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 4

Pode-se notar que os perfis de velocidade obtidos através da simulação numérica apresentam uma estimativa maior de velocidade que os dados experimentais para alturas inferiores a 350 milímetros acima da superfície.

5.5.5 Perfil de velocidades sobre o ponto 5

O ponto 5 está compreendido entre os pontos 4 e 6. Os perfis de velocidade através de simulação numérica e dados experimentais podem ser observados na ilustração da Figura 5.15.

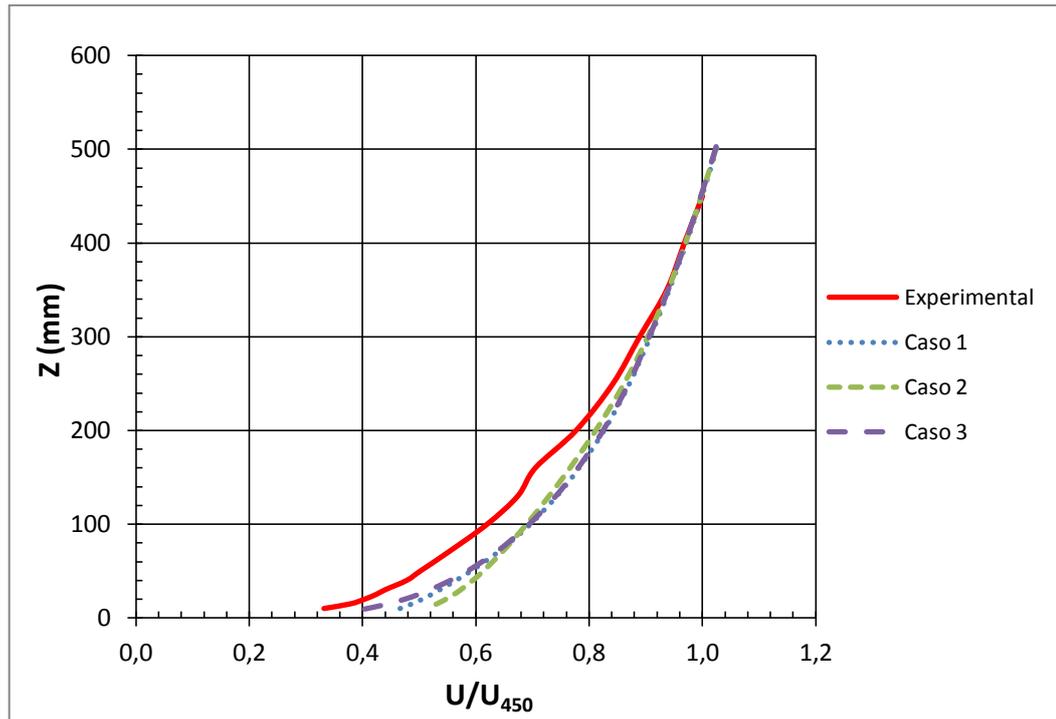


Figura 5.15 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 5

Também nota-se que os perfis de velocidade obtidos através da simulação numérica apresentam uma estimativa maior de velocidade que os dados experimentais para alturas inferiores a 350 milímetros acima da superfície.

5.5.6 Perfil de velocidades sobre o ponto 6

O ponto 6 está localizado próximo à entrada do domínio. Assim desta forma espera-se que o perfil de velocidades seja praticamente o perfil de entrada no domínio. Através da Figura 5.16 é possível observar no gráfico os perfis de velocidade para simulação numérica e os dados experimentais sobre o ponto.

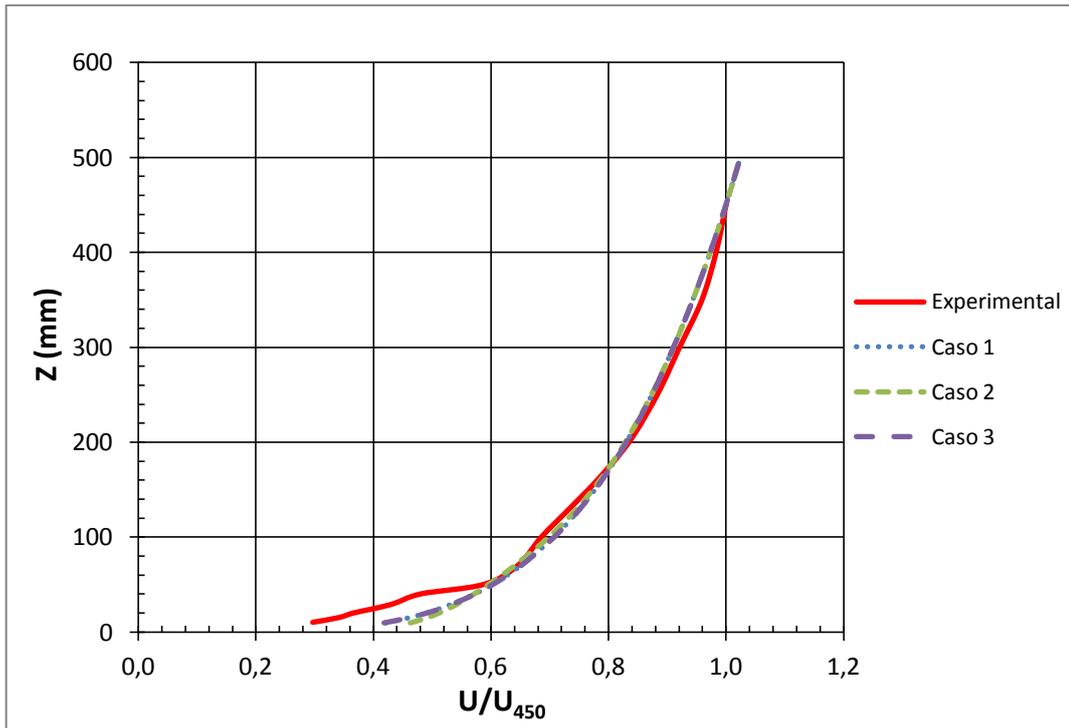


Figura 5.16 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 6

Pode-se observar uma conexão do comportamento dos perfis de velocidade entre os dados experimentais e os resultados obtidos através de simulação numérica.

5.5.7 Perfil de velocidades sobre o ponto 7

O ponto 7 é o primeiro ponto após o pico do morro. Está localizado entre os pontos 1 e 8 da diretriz principal. Os resultados obtidos por simulação numérica apontam para um ponto de inflexão devido ao gradiente adverso de pressão, conforme pode ser demonstrado da Figura 5.17.

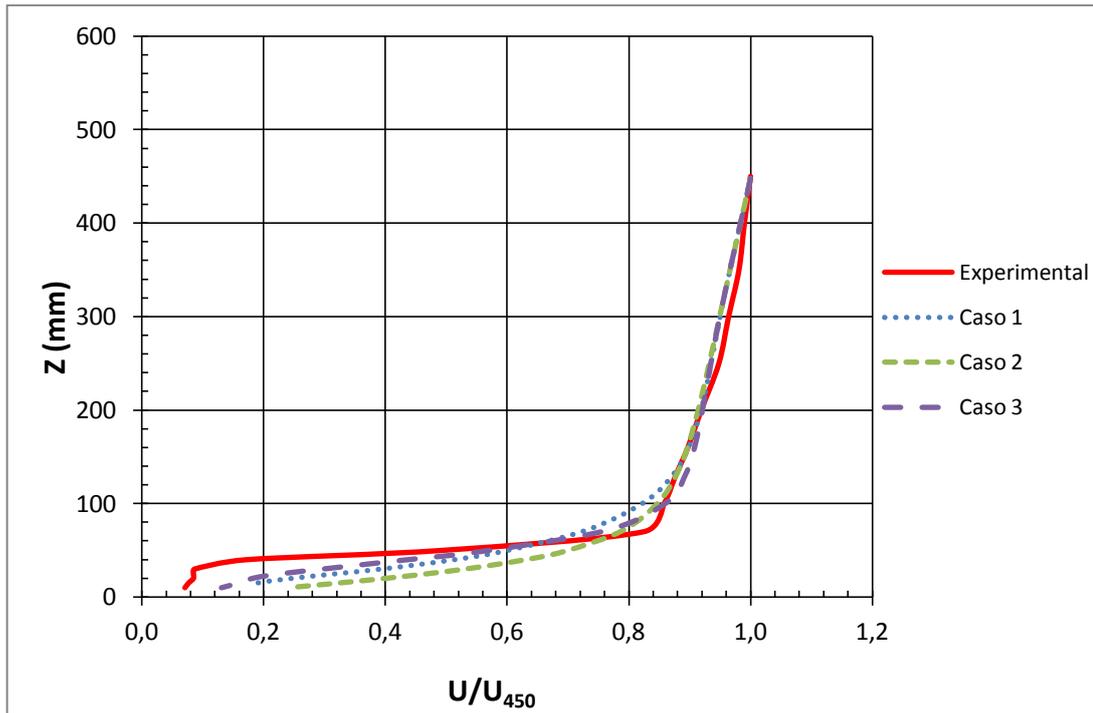


Figura 5.17 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 7

Conforme pode ser observado, os resultados obtidos por simulação numérica estão de acordo com os dados experimentais. Pois nos casos avaliados percebe-se uma aceleração brusca do escoamento a partir de 50 milímetros acima do ponto de interesse com resultados relativamente próximos entre a simulação numérica e os dados experimentais.

5.5.8 Perfil de velocidades sobre o ponto 8

Este é o penúltimo ponto a ser avaliado, está localizado entre os pontos 7 e 9 da diretriz principal. Os resultados alcançados pela simulação numérica condizem com os dados experimentais conforme pode ser observado na Figura 5.18.

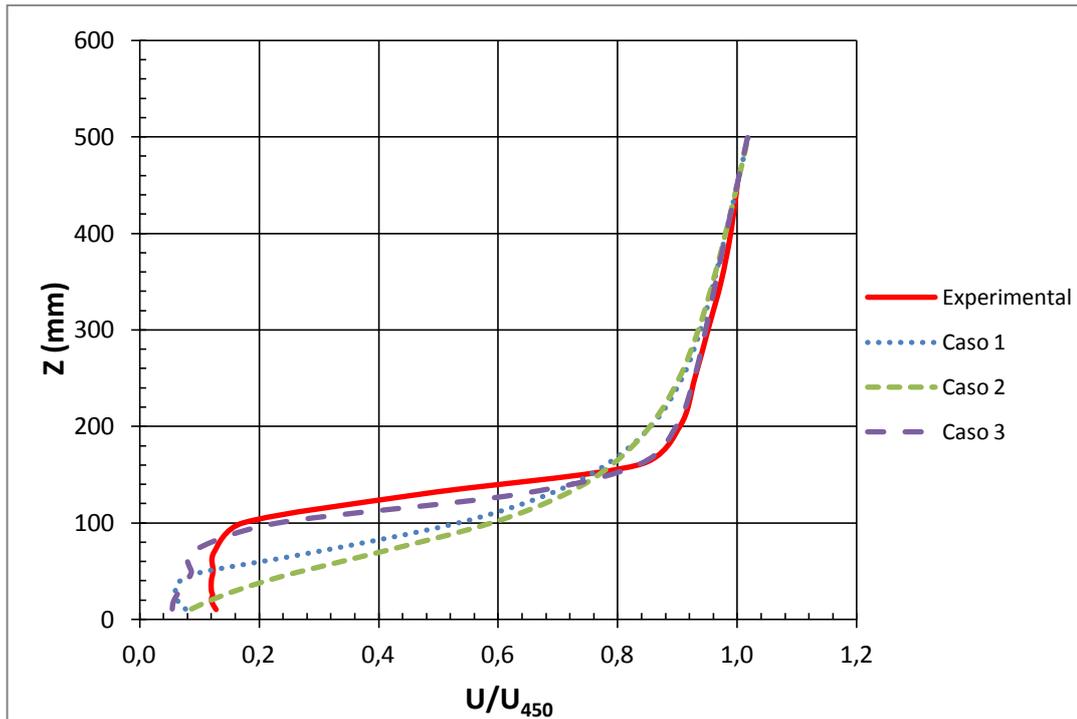


Figura 5.18 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 8

Assim como já foi observado no perfil sobre o ponto 7, percebe-se uma aceleração brusca do escoamento em função da altura, entretanto apenas os dados do caso 3 obtidos através de simulação numérica com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST apresenta resultados que melhor condizem com os dados experimentais em túnel de vento.

5.5.9 Perfil de velocidades sobre o ponto 9

O ponto 9 é o último ponto a ser avaliado. É o ponto mais afastado do ponto mais alto do morro. A Figura 5.19 ilustra os perfis de velocidade sobre este ponto obtido através de simulação numérica e dados experimentais.

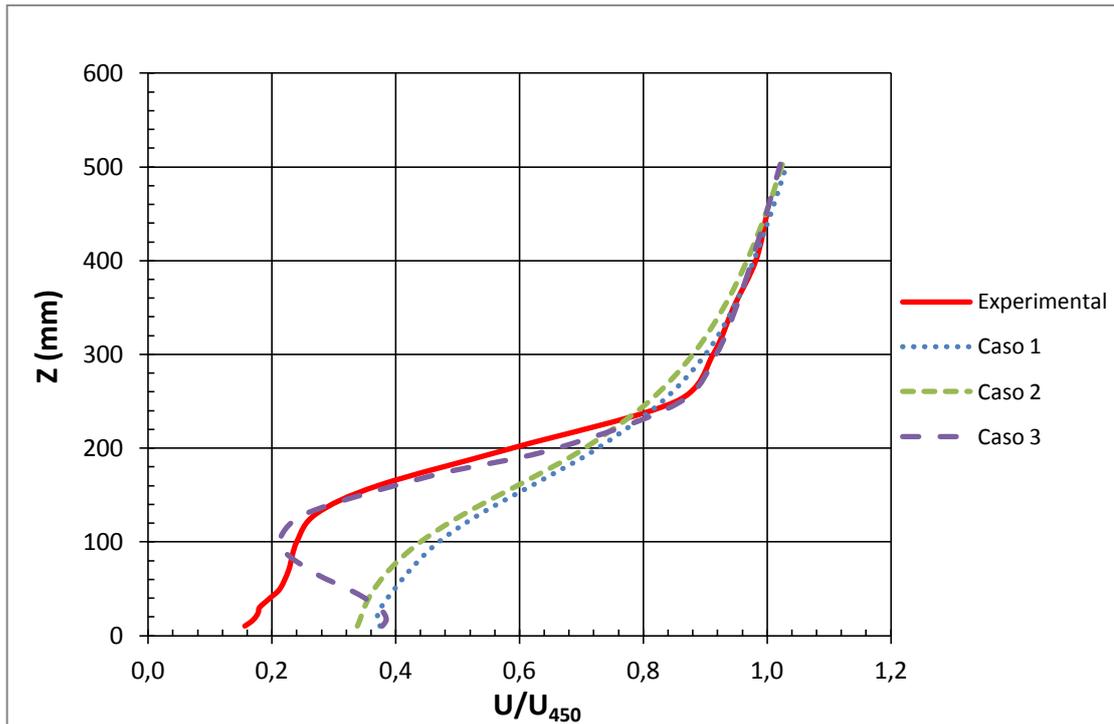


Figura 5.19 – Perfis de Velocidade sobre o ponto 9

De acordo com a Figura 5.19, é possível observar que a simulação numérica com a utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST é o que melhor se aproxima com os dados experimentais realizados em túnel de vento, entretanto próximo à superfície os resultados se afastam do experimental.

5.5.10 Diferença relativa entre os casos avaliados

A Tabela 5.2 apresenta as diferenças relativas entre os resultados alcançados via simulação numérica e os dados experimentais.

Tabela 5.2 – Diferença relativa entre os casos avaliados

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	0,013430	0,022441	0,016096
2	0,172322	0,192242	0,153627
3	0,082494	0,112830	0,076910
4	0,093100	0,120212	0,082103
5	0,138437	0,170692	0,107403
6	0,114851	0,133578	0,115141
7	0,811898	1,304294	0,531750
8	0,384328	0,455846	0,231459
9	0,642882	0,555604	0,451135
média	0,272638	0,340860	0,196180

Os dados ilustrados na Tabela 5.2 confirmam a expectativa para a escolha da escolha do modelo de turbulência mais adequado ao problema. Para o caso 1, onde as simulações foram executadas através da utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST, onde os dados obtidos para os perfis de velocidade apresentam uma diferença relativa total aproximada de 27%, porém para a superfície do morro rugosidade foi negligenciada, e o modelo ensaiado em túnel de vento apresenta degraus com o objetivo de forçar o descolamento da camada limite fazendo com que a simulação executada não condiz exatamente com o ensaio experimental.

Diferente do caso 1, o caso 2, estipula-se um comprimento de rugosidade para a superfície, que tenta representar os degraus do modelo utilizado no ensaio. Foi considerado um comprimento de rugosidade de 0,005 metros. Neste caso as simulações foram executadas utilizando o modelo de turbulência utilizado em alguns programas de prognósticos de energia eólica, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$. O objetivo da escolha deste modelo é apenas comparativo. Para o caso 2 o a diferença relativa total aproximada para os perfis de velocidade é de 34%

O caso 3 foi estipulado o mesmo comprimento de rugosidade utilizado no caso 2 e o modelo de turbulência escolhido durante as simulações foi o $k-\omega$ SST. Neste caso os perfis de velocidade apresentam um resultado mais próximo aos dados obtidos através de ensaio experimental que os casos anteriores. A diferença relativa total aproximada para os perfis de velocidade é de 19%.

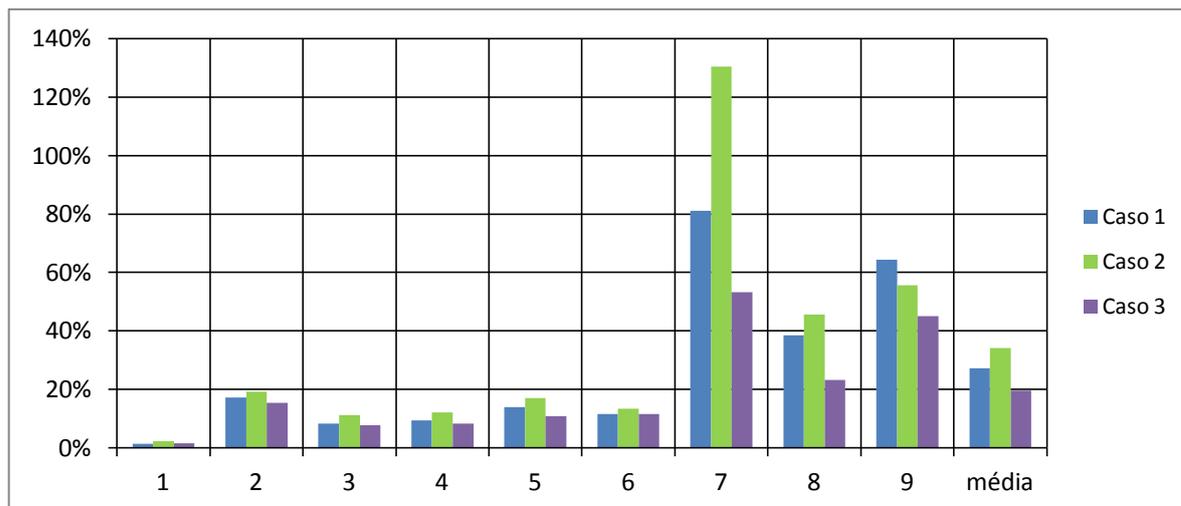


Figura 5.20 – Diferença relativa para os casos avaliados

A Figura 5.20 representa os dados da Tabela 5.2 em forma de gráfico de barras. É possível observar que os resultados alcançados para o caso 3, em todos os pontos, é o que melhor se aproxima dos dados experimentais. Também se observa que para o caso 1 é o que mais se afasta, exceto no ponto 9.

5.6 Campo de velocidades sobre a superfície

Após a avaliação dos melhores resultados para os casos apresentados, nos próximos tópicos serão apresentados o campo de velocidades sobre a superfície. O objetivo desta análise é observar as regiões onde possui o melhor potencial eólico para instalação das turbinas. Os campos ilustrados foram obtidos através dos resultados das simulações para o caso 3, onde foi considerada uma rugosidade superficial $Z_0 = 5$ mm e o modelo de turbulência $k - \omega$ SST.

5.6.1 Campo de velocidades sobre a superfície à 100 mm

Na Figura 5.21 é ilustrado o campo de velocidade em um plano de 100 milímetros sobre o ponto mais baixo da superfície.

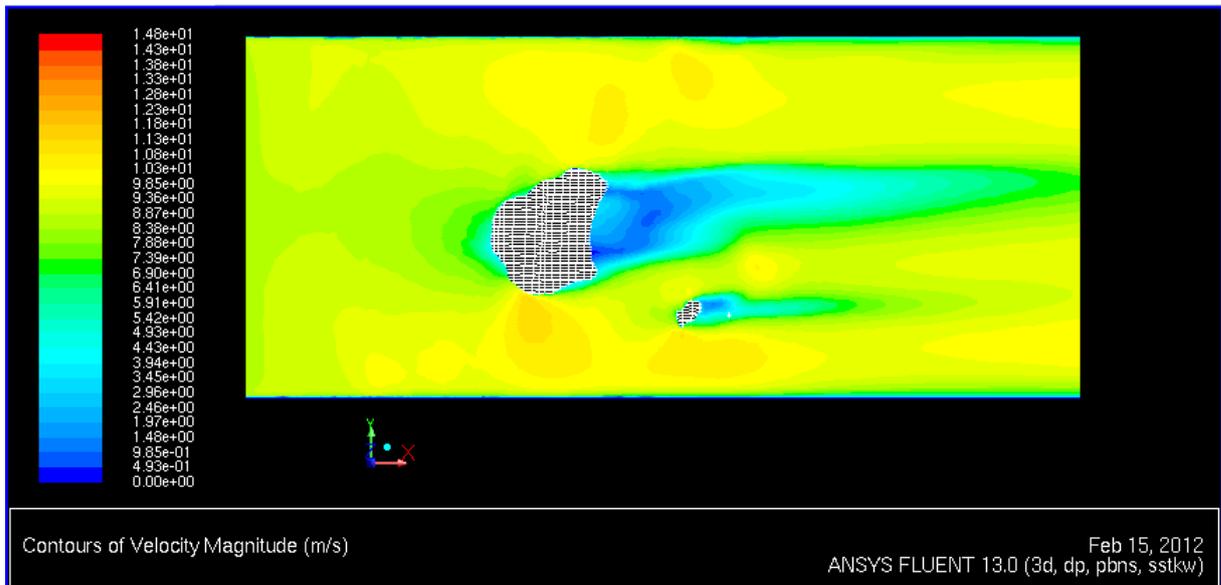


Figura 5.21 – Campo de velocidades a 100 mm

O campo de velocidades do escoamento é possível observar uma região de esteira do morro onde as velocidades são afetadas pela geometria da superfície. A montante também ocorre uma redução da velocidade do escoamento, porém em menor intensidade.

5.6.2 Campo de velocidades sobre a superfície à 150 mm

O campo de velocidade em um plano de 150 milímetros sobre o ponto mais baixo da superfície é ilustrado na Figura 5.22.

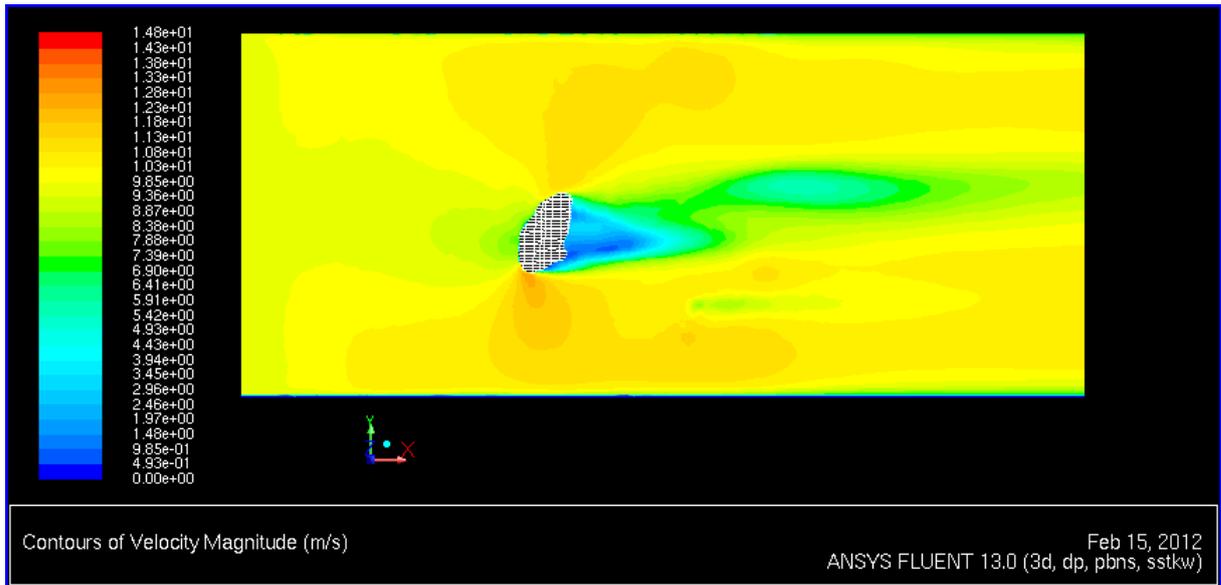


Figura 5.22 – Campo de velocidades a 150 mm

A Figura 5.22 ilustra que o campo de velocidades em um plano a 150 mm apresenta o mesmo comportamento que o campo a 100 mm. Entretanto a região de esteira do morro onde as velocidades são afetadas pela geometria da superfície é menor que no caso anterior. A montante do cume do morro também se observa uma região onde a velocidade do escoamento é afetada pela geometria.

5.6.3 Campo de velocidades sobre a superfície à 200 mm

Em um plano de 200 milímetros sobre o ponto mais baixo da superfície é ilustrado o campo de velocidades do escoamento na Figura 5.23.

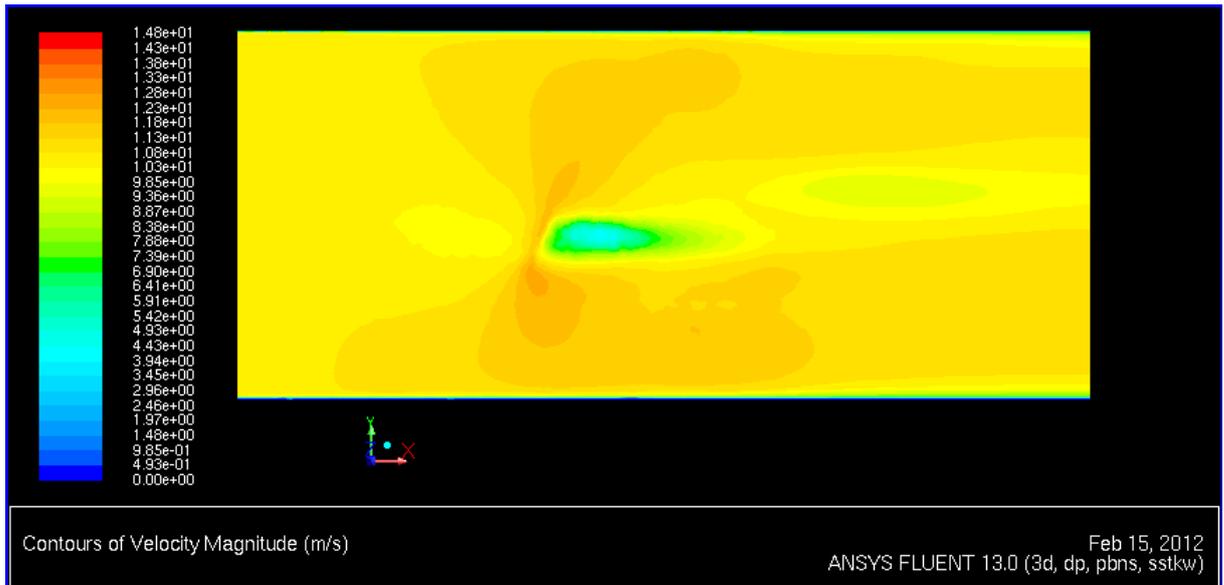


Figura 5.23 – Campo de velocidades a 200 mm

Este plano está localizado acima do ponto mais alto da superfície. Na Figura 5.22 pode observar uma região próxima ao ponto mais alto da superfície onde ocorre uma aceleração do escoamento e a jusante deste ponto percebe-se também uma região de desaceleração.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação representa um estudo da aplicação de CFD para análise do potencial eólico em terrenos complexos. O estudo é realizado a partir da simulação numérica do vento sobre um modelo topográfico. Foram avaliados a metodologia e o processo de aplicação de CFD, como o estudo da qualidade de malha e a configuração do escoamento do vento ao longo da superfície. Modelos de turbulência foram examinados e comparados com dados obtidos em ensaio em túnel de vento. De acordo com os resultados obtidos durante as simulações conclui-se:

Os perfis de velocidades obtidos numericamente apresentaram um comportamento coerente em relação aos perfis de velocidade medidos em túnel de vento, mas também se percebe uma divergência entre os resultados numéricos e os dados experimentais na região de descolamento conforme pode ser observado nas Figuras 5.11 a 5.19.

A metodologia RANS empregada, juntamente com a malha de volumes finitos, permitiu o desenvolvimento de simulações com relativo baixo tempo de processamento, (da ordem de 24 horas). O tempo de processamento necessário para a análise não pode ser muito elevado quando se tem o objetivo de analisar o potencial eólico de uma microrregião, tendo em vista que as simulações devem ser realizadas em diversas direções do vento, bem como diferentes velocidades de entrada no domínio.

Através da análise do comportamento do perfil de velocidade alcançado via simulação numérica para o caso 1, onde se desconsiderou a rugosidade superficial e utilizou-se o modelo de turbulência $k - \omega$ SST, observaram-se os perfis de velocidades sobre os pontos em estudo. Pelo fato de negligenciar a rugosidade da superfície, observou-se uma maior aceleração do escoamento próxima à superfície em todos os pontos em análise. Na região a de esteira, onde estão localizados os pontos 7,8 e 9, percebe-se uma maior divergência dos valores da velocidade próxima a superfície obtidos computacionalmente em relação aos dados experimentais. A diferença relativa para estes pontos são 81%, 38% e 64% respectivamente. A diferença relativa média para o caso 1 é de 27%.

A análise do comportamento do perfil de velocidade alcançado via simulação numérica para o caso 2, onde se utilizou o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e uma altura de rugosidade superficial de 5 milímetros. Os resultados alcançados foram menos satisfatórios que o caso 1. Para a região de esteira da elevação, onde estão localizados os pontos 7,8 e 9, a diferença relativa para esses pontos foram de 130%, 46% e 55% respectivamente. A diferença

relativa média para o caso 2 é de 34%. Isto mostra como a escolha do modelo inadequado pode influenciar no resultado de forma mais expressiva que ignorar os efeitos da rugosidade superficial do modelo.

Para o caso 3 as simulações foram realizadas com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST e uma altura de rugosidade superficial de 5 milímetros. Os resultados alcançados se mostraram mais satisfatórios que os casos anteriores. Na região da esteira, a diferença relativa alcançada para os pontos 7,8 e 9 foram de 53%, 23% e 45% respectivamente. A diferença relativa média para o caso 3 é de 19%.

Na análise dos três casos observa-se que na região a montante do topo do morro os valores dos erros relativos apresentam uma relação satisfatória com os dados experimentais onde a diferença relativa média para os casos 1,2 e 3 são de 10%, 11% e 9% respectivamente mostrando uma boa aproximação. Assim desta forma a região da esteira é a principal responsável pelo aumento da magnitude da diferença média relativa verificadas nos casos avaliados

De acordo com a Figura 5.19, o perfil de velocidades alcançado para o caso 3, onde foi considerado o modelo de turbulência $k - \omega$ SST, pode-se observar que os resultados obtidos através de simulação numérica são os que melhor satisfazem o perfil de velocidade medido em túnel de vento, entretanto na região próxima a superfície também verificou um afastamento dos resultados. Isto demonstra que na região da esteira o modelo utilizado ainda apresenta dificuldades para determinar o escoamento nesta região. Assim sugere-se fazer uma análise utilizando a metodologia de LES e também um maior número de pontos de medição para uma melhor predição do comportamento nesta região. Do ponto de vista dos dados experimentais, sugere-se realizar um experimento específico para produzir dados mais detalhados para a simulação numérica, como levantamento experimental da altura de rugosidade e detalhado por medição o perfil de entrada, em três dimensões.

As Figuras 5.20 até 5.22, as quais ilustram o campo de velocidades para três alturas distintas, é possível determinar as regiões onde existe um melhor potencial eólico para instalações de futuras fazendas eólicas localizadas em terrenos de superfície complexa.

Os resultados alcançados através da simulação numérica a partir das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, mostrou-se bastante eficaz para região a montante e o cume do morro. Entretanto se observou dificuldades na predição do perfil de velocidades na região de esteira, visto que os dados obtidos por simulação numérica não alcançaram aqueles obtidos experimentalmente. Desta forma, sugere-se para trabalhos futuros a utilização de mais

medições experimentais e utilização da metodologia de LES para solução das equações governantes para garantir uma melhor predição do comportamento do vento na região de esteira.

7 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS DO AUTOR

De Freitas Filho, D. G. R.; Petry, A. P.; Küchle, J. **Use of Computational Fluid Dynamics Analysis of Wind Power Potential of a Micrositing.** COBEM – Brazilian Congress of Mechanical Engineering 2011, Natal-RN, 2011.

Petry, A. P.; Ludwig, D. E.; De Freitas Filho, D. G. R. **Turbulence Models in CFD Simulations of Wind Turbine Wake.** DEWEK - German Wind Energy Conference, 2010, Bremen. Turbulence Models in CFD Simulations of Wind Turbine Wake. Osnabrück : Steinbacher Druck GmbH, 2010.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansys. **UDF Manual V.12**. [S.l.]. 2009.
- Antonia, R. A.; Krogstad, P.-A. Surface roughness effects in turbulent boundary layers. **Experiments in Fluids**. Vol. 27, p. 450-460, 1999.
- Aynsley, R. M.; Melbourne, W.; Vickery, B. J. **Architectural Aerodynamics**. Applied Science, [s.n.], 1977.
- Blessmann, J. **Aerodinâmica nas Construções**. Sagra, Porto Alegre, 1990.
- Boçon, F. T. **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. Florianópolis. 1998.
- Conover, K.; Davis, E. **PLanning your first wind power project**. [S.l.]. 1994.
- Custódio, R. D. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2009.
- Fallo, D. **Wind Energy Resource Evaluation in Site of Central Italy by CFD Simulations**. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI. Cagliari, Italia. 2007.
- Fox, R. W.; McDonald, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, Rio de Janeiro, 2001.
- Garratt, J. R. **The Atmospheric Boundary Layer**. [S.l.], New York, 1992.
- LAC, LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES. **Relatório Interno de Medições morro 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. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência Vol.4**. Rio de Janeiro: ABCM, 2004. p. 137-163.
- Ludwig, D. E. **Análise Numérica da Influência de Fatores Atmosféricos na Esteira Aerodinâmica de Turbinas Eólicas**. Porto Alegre. 2011.
- 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 - India, 2009.
- Meira; Fernandez. **O Cluster Sun Fire e o sistema de filas**. Porto Alegre. 2011.
- 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. D.; MANSUR, S. S. **Turbulência Vol.2**. Rio de Janeiro: ABCM, 2003. Cap. 4, p. 203-244.

Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. Turbulência: Fundamentos. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência Vol 4**. Rio de Janeiro: ABCM, 2004. p. 1-32.

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

NBR-6123. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. [S.l.]. 1988.

Petry, A. P. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 2002.

Piccoli, G. **Análise numérica da engenharia do vento computacional empregando computação de alto desempenho e simulação de grandes escalas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

Schlichting, D. H. **Boundary-Layer Theory**. McGraw-Hill, New York - USA, 1978.

Silveira Neto, A. D. Fundamentos da Turbulência em Fluidos. In: FREIRE, A. P. S.; MENUT, P. P. M.; SU, J. **Turbulência**. Rio de Janeiro: ABCM, 2002. p. 2-48.

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

Troen, I.; Petersen, E. L. **European Wind Atlas**. Riso National laboratory, Roskilde, Dinamarca, 1989.

Vasconcelos, P. Energia em Expansão. **Renergy Brasil n°5**, p. 47-60, 2011.

Vilicic, F. Rendição Nuclear. **Veja edição 2220 - ano 44 - n°23**, p. 96-98, 2011.

Wilcox, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Anaheim, CA - USA, 1998.

Xiao, Y.-Q.; Li, C.; Ou, J.-P.; Song, L.-L. CFD Approach to the Micrositing of Wind Turbines in Complex Terrain. **Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments - ASCE**, p. 1992-2000, 2010.

Zilitinkevich, S.; Baklanov, A. Calculation of the height of the stable boundary layer in practical applications. **Boundary Layer Meteorology Vol.105**, p. 389-409, 2002.

ANEXO

O código fonte utilizado para o perfil de velocidades, UDF (*User-Defined Function*) nas simulações.

```
#include "udf.h"
float abs(float x)
{
    if( x < 0 )
        return -x;
    else
        return x;
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
    real x[ND_ND];          /* this will hold the position vector */
    real Z;
    real CC;
    real VREF = 14.27;     /*VELOCIDADE EM Z=0.8*/
    real P1 = 0.23;        /*EXPOENTE RUGOSO 0.23*/
    real P2 = 0.11;        /*EXPOENTE LISO 0.11*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        Z = x[2];
        CC = 1-abs((Z-0.8)/0.8);
        if (CC<=0.8)
            F_PROFILE(f, thread, position) = VREF*pow(CC,P1);
        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = VREF*pow(CC,P2);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```