

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

INVESTIGAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SIMULADA EM TUNEL DE
VENTO NO TOPO DE MORROS UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)

por

Tanit-Daniel Jodar Vecina

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março 2017

INVESTIGAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SIMULADA EM TUNEL DE
VENTO NO TOPO DE MORROS UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)

por

Tanit-Daniel Jodar Vecina
Engenheiro Industrial

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 a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Profa. Dra. Adriane Prisco Petry

Aprovado por:

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller, PROMEC / UFRGS

Profa. Dra. Jussara Maria Leite Mattuella, LAC / UFRGS

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula, DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23, Março 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES, por me agraciar com uma bolsa de estudos.

Agradeço ao CESUP, por disponibilizar os recursos computacionais necessários para a realização do presente trabalho.

Agradeço a professora Adriane Petry pela ajuda durante todo o processo que envolveu minha formação acadêmica.

Agradeço a todos os que fizeram parte desses estudos e os que têm por vir futuramente.

RESUMO

O formato do perfil de velocidades do vento varia de acordo com as características locais da superfície terrestre e de rugosidade do terreno, parâmetros que definem o perfil da Camada-Limite Atmosférica (CLA). As características do escoamento do ar atmosférico sobre e ao redor de acidentes geográficos, tais como morros e colinas, são de grande interesse para aplicações relacionadas à Engenharia de Turbinas e Parques Eólicos. No topo de morros, ocorre a aceleração do vento, fenômeno que pode representar um fator decisivo para a instalação de aerogeradores. Este trabalho dedica-se ao estudo do comportamento da CLA como função da inclinação e rugosidade superficial da elevação, fazendo uso da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para construir perfis de velocidade do vento e de intensidade de turbulência. O problema de fechamento das Equações Médias de Reynolds (RANS) é contornado com o uso do modelo de turbulência $k-\omega$ SST; os resultados numéricos obtidos são comparados com dados experimentais medidos em túnel de vento sobre modelos em escala dos morros. São testados oito modelos de morros com declives que variam de 25° a 64° para dois tipos de categorias de terreno, em 2D e 3D, e são aplicados dois códigos analíticos para representar o perfil de velocidades de entrada. Resultados numéricos para os perfis de velocidade apresentam diferença inferior a 4% em relação aos respectivos dados obtidos experimentalmente. Os perfis de intensidade de turbulência apresentam diferença máxima na casa dos 7% em comparação aos dados experimentais, o que é explicado pelo fato de que não é possível inserir o perfil de entrada de intensidade de turbulência nas simulações numéricas. Em alternativa, foi usado um valor constante resultado da média dos valores dos perfis usados no túnel de vento. Os modelos de morro em 3D apresentam maior concordância nos resultados de velocidade que os modelos em 2D e que ademais quanto maior é a inclinação do morro maior é a concordância com as medições experimentais.

Palavras-chave: Camada Limite Atmosférica; Dinâmica dos Fluidos Computacional; Modelagem Numérica; Túnel de Vento.

ABSTRACT

The shape of the wind velocity profile changes according to local features of terrain shape and roughness, which are parameters responsible for defining the Atmospheric Boundary Layer (ABL) profile. Air flow characteristics over and around landforms, such as hills, are of considerable importance for applications related to Wind Farm and Turbine Engineering. The air flow is accelerated on top of hills, which can represent a decisive factor for Wind Turbine placement choices. The present work focuses on the study of ABL behavior as a function of slope and surface roughness of hill-shaped landforms, using the Computational Fluid Dynamics (CFD) to build wind velocity and turbulent intensity profiles. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations are closed using the *SST $k-\omega$* turbulence model; numerical results are compared to experimental data measured in wind tunnel over scale models of the hills under consideration. Eight hill models with slopes varying from 25° to 64° were tested for two types of terrain categories in 2D and 3D, and two analytical codes are used to represent the inlet velocity profiles. Numerical results for the velocity profiles show differences under 4% when compared to their respective experimental data. Turbulent intensity profiles show maximum differences around 7% when compared to experimental data, this can be explained by not being possible to insert inlet turbulent intensity profiles in the simulations. Alternatively, constant values based on the averages of the turbulent intensity at the wind tunnel inlet were used. The 3D models present greater concordance in the speed results than the 2D models and that in addition the greater the slope of the hill, the greater the agreement with the experimental measurements.

Keywords: Atmospheric Boundary Layer; Computational Fluid Dynamic (CFD); Numerical Modeling; Wind Tunnel.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 POTENCIAL EÓLICO.....	4
2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA).....	5
2.2.1 PERFIL DE VELOCIDADE.....	6
2.3 MICROSITING.....	7
2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3 METODOLOGIA	10
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA EXPERIMENTAL.....	11
3.1.1 MODELOS ANALÍTICOS DE MORROS ESTUDADOS.....	11
3.1.2 ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO.....	14
3.2 METODOLOGIA NUMÉRICA.....	14
3.2.1 DOMÍNIOS COMPUTACIONAIS.....	14
3.2.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO.....	16
3.2.3 VENTO SIMULADO.....	22
3.2.4 INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA.....	24
3.2.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	26
3.2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	26
4 RESULTADOS	31
4.1 CAMPO DE VELOCIDADES.....	31
4.2 CAMPO DE ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA.....	37
4.3 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL - NUMÉRICO.....	43
4.3.1 PERFIL DE VELOCIDADES.....	43
4.3.2 PERFIL DE INTENSIDADE DE TURBULENCIA.....	50
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE A	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação da CLA com a região laminar, de transição e turbulenta.....	6
Figura 3.1	Modelo analítico: A - $\alpha = 25^\circ$ (a) 2D e (b) 3D.....	12
Figura 3.2	Modelo analítico: B - $\alpha = 32^\circ$ (a) 2D e (b) 3D.....	13
Figura 3.3	Modelo analítico: C - $\alpha = 52^\circ$ (a) 2D e (b) 3D.....	13
Figura 3.4	Modelo analítico: D - $\alpha = 64^\circ$ (a) 2D e (b) 3D.....	13
Figura 3.5	Modelo computacional A - $\alpha = 25^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.....	15
Figura 3.6	Modelo computacional B - $\alpha = 32^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.....	15
Figura 3.7	Modelo computacional C - $\alpha = 52^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.....	15
Figura 3.8	Modelo computacional D - $\alpha = 64^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.....	16
Figura 3.9	Malha modelo 2D: (a) tetraédrica e (b) camada prismática.....	17
Figura 3.10	Malha modelo 3D: (a) tetraédrica e (b) camada prismática.....	18
Figura 3.11	Subdivisões da região da parede dependentes do y^+	19
Figura 3.12	Campo de y^+ na superfície do morro A - $\alpha = 25^\circ$: (a) 2D e (b) 3D ...	20
Figura 3.13	Campo de y^+ na superfície do morro B - $\alpha = 32^\circ$: (a) 2D e (b) 3D ...	21
Figura 3.14	Campo de y^+ na superfície do morro C - $\alpha = 52^\circ$: (a) 2D e (b) 3D ...	21
Figura 3.15	Campo de y^+ na superfície do morro D - $\alpha = 64^\circ$: (a) 2D e (b) 3D ...	21
Figura 3.16	Perfis de velocidade de entrada.....	23
Figura 3.17	Perfis de intensidade de turbulência de entrada.....	25
Figura 4.1	Campo de velocidades morro A.....	33
Figura 4.2	Campo de velocidades morro B.....	34
Figura 4.3	Campo de velocidades morro C.....	35
Figura 4.4	Campo de velocidades morro D.....	36
Figura 4.5	Campo de energia cinética turbulenta morro A.....	39
Figura 4.6	Campo de energia cinética turbulenta morro B.....	40
Figura 4.7	Campo de energia cinética turbulenta morro C.....	41
Figura 4.8	Campo de energia cinética turbulenta morro D.....	42
Figura 4.9	Perfis de velocidade no cume do modelo A 3D experimental e	

	numérico.....	44
Figura 4.10	Perfis de velocidade no cume do modelo A 2D experimental e numérico.....	45
Figura 4.11	Perfis de velocidade no cume do modelo B 3D experimental e numérico.....	46
Figura 4.12	Perfis de velocidade no cume do modelo B 2D experimental e numérico.....	46
Figura 4.13	Perfis de velocidade no cume do modelo C 3D experimental e numérico.....	47
Figura 4.14	Perfis de velocidade no cume do modelo C 2D experimental e numérico.....	48
Figura 4.15	Perfis de velocidade no cume do modelo D 3D experimental e numérico.....	49
Figura 4.16	Perfis de velocidade no cume do modelo D 2D experimental e numérico.....	49
Figura 4.41	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo A 3D experimental e numérico.....	50
Figura 4.42	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo A 2D experimental e numérico.....	51
Figura 4.43	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo B 3D experimental e numérico.....	51
Figura 4.44	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo B 2D experimental e numérico.....	52
Figura 4.45	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo C 3D experimental e numérico.....	53
Figura 4.46	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo C 2D experimental e numérico.....	53
Figura 4.47	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo D 3D experimental e numérico.....	54
Figura 4.48	Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo D 2D experimental e numérico.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Dimensões dos modelos em escala tridimensionais.....	12
Tabela 3.2	Dimensões dos modelos em escala bidimensionais.....	12
Tabela 3.3	Número de elementos das malhas dos domínios dos modelos 2D e 3D.....	16
Tabela 3.4	Resultados de independência de malha.....	18

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNS	Simulação Numérica Direta
MEF	Método dos Elementos Finitos
N-S	Navier-Stokes (equações)
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
CLS	Camada Limite Superficial
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UDF	<i>User Defined Function</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, [m ²]
v	Velocidade, [m/s]
Re	Número de Reynolds, adimensional
C_p	Coefficiente de potência, adimensional
k	Energia cinética da turbulência, [m ² /s ²]
l	Escala de comprimento da turbulência, [m]
P	Potência, [W]
t	Tempo, [s]
t_{ij}	Tensor de tensões de Cauchy
u	Velocidade de corrente livre, [m/s]
u^*	Velocidade de fricção na parede, [m/s]
$u_{i,j,k}$	Campos de velocidade nas direções principais, [m/s]
$U_{i,j,k}$	Componente média temporal da velocidade, [m/s]
$u'_{i,j,k}$	Componente de flutuação da velocidade, [m/s]
x	Coordenada global horizontal, [m]
$x_{i,j,k}$	Direções principais, [m]
y	Coordenada global vertical, [m]
y^+	Distância até a parede, adimensional
γ	Intermitência da turbulência
Γ	Coefficiente de difusão
δ_2	Espessura da quantidade de movimento, [m]
δ_{ij}	Delta de <i>Kronecker</i>
ε	Dissipação de tensões turbulentas, [m ² /s ³]
μ	Viscosidade dinâmica, [Pa.s]
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta, [Pa.s]
ν	Viscosidade cinemática, [m ² /s]
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta, [m ² /s]
ρ	Massa específica, [kg/m ³]
τ	Valor de tempo determinado, [s]
τ_{ij}	Tensor de Reynolds
τ_{xy}	Tensor de Reynolds nas direções x e y

φ	Ângulo relativo do vento, [rad]
ϕ	Variável escalar genérica
ψ	Distância em relação à parede, [m]
ω	Taxa de dissipação específica, [s ⁻¹]
Z	Altura do perfil de velocidade, [m]
Z_{ref}	Altura de referencia do perfil de velocidade, [m]
Z_0	Rugosidade aerodinâmica, [m]
p	Exponente lei de potencia, adimensional
I_u	Intensidade de turbulência, adimensional

1 INTRODUÇÃO

A estrutura do perfil de velocidades do vento varia de acordo com as características do terreno e a rugosidade da superfície terrestre, diminuindo sua intensidade proporcionalmente de acordo com a paisagem circundante que determina o perfil da Camada Limite Atmosférica (CLA). O escoamento em terreno complexo varia imprevisivelmente, dependendo das variações diárias e sazonais na estabilidade térmica das massas de ar que fluem. Além disso, fenômenos geofísicos como estratificação térmica e rotação da Terra podem adicionar complexidade ao cenário. A velocidade média do vento aumenta com a altitude. Além disso, a turbulência na camada limite e sua estrutura vertical e evolução no tempo dependem das características do terreno, da rugosidade da superfície e dos elementos do entorno. A camada limite na faixa de 1 a 2 km da atmosfera é a região mais influenciada pela troca de momento, calor e vapor de água na superfície da Terra. Movimentos turbulentos em escalas de tempo de uma hora ou menos dominam o escoamento nesta região, transportando as propriedades atmosféricas tanto horizontal como verticalmente através de seu comprimento. As propriedades médias do escoamento nesta camada - velocidade do vento, temperatura e umidade - experimentam seus gradientes mais acentuados nos primeiros 50 ou 100 m, região apropriadamente chamada de camada superficial. A troca de energia turbulenta nesta camada superficial controla a troca de calor, massa e momentum na superfície e, assim, o estado de toda a camada limite [Lazeroms, 2015]. As características do escoamento através de formas topográficas, tais como morros, são de grande interesse para muitas aplicações, especialmente aquelas relacionadas com a engenharia eólica, como a identificação de cargas de vento em edifícios, pontes e linhas de transmissão, estudos de dispersão de poluentes, entre outros.

O presente trabalho investiga os fenômenos relacionados ao escoamento do ar na camada limite turbulenta, como a análise da estrutura do perfil de velocidade do vento no topo dos morros e o efeito de aceleração. A comparação dos efeitos topográficos sobre a velocidade do vento é apresentada através de simulações numéricas aplicadas para oito modelos de morros com dois códigos iniciais que representam o perfil de velocidade e a rugosidade do terreno.

A dinâmica dos fluidos computacional baseada na solução numérica das equações de conservação de massa e energia de Navier-Stokes, pode simular a CLA

preservando todas as condições de similaridade, simulando as dimensões do problema real. As simulações numéricas do escoamento de ar sobre os morros são realizadas com o uso do software 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 modelo de turbulência utilizado para resolver as simulações em RANS foi o $k-\omega$ SST, que tem um melhor desempenho no cálculo de gradientes de pressão adversos (desprendimento da CLA) e é amplamente utilizado para escoamentos em terrenos [Wilcox, 1998 e Silveira Neto, 2002].

Os resultados de velocidade e intensidade de turbulência obtidos nas simulações numéricas foram comparados nos mesmos pontos com os dados experimentais obtidos no túnel de vento por Mattuella, 2012, a fim de estabelecer correlações entre ambas as metodologias.

1.1 OBJETIVOS

O trabalho apresenta uma pesquisa sobre os fenômenos relacionados ao escoamento da CLA sobre uma topografia simples (morros com diferentes inclinações) através da dinâmica dos fluidos computacional analisando os resultados de velocidade média do vento, intensidade de turbulência e identificando regiões de separação da camada limite, tais como recirculações e desprendimento de vórtices.

Os objetivos gerais deste trabalho são avaliar as características do vento (velocidade, direção, intensidade de turbulência, espessura da CLA) provocadas pelo formato dos morros de estudo por meio de um estudo numérico resolvido mediante CFD e validar os resultados obtidos com as medições experimentais realizadas no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC).

Como objetivo específico deste trabalho busca-se validar a metodologia de CFD para substituir testes experimentais em túnel de vento devido à dificuldade e custo de realização. Outro objetivo específico é consolidar essa metodologia para a avaliação do potencial eólico em terrenos complexos e assim otimizar esse potencial na hora de projetar o layout um parque eólico.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escassez de estudos utilizando ferramentas computacionais como o método dos volumes finitos através de CFD para avaliação da variação do escoamento externo sobre topografias reais é a justificativa principal do presente estudo. Pode-se dizer que na atualidade existem modelos analíticos ou normas para avaliar as características do vento, mas esses modelos apresentam valores conservadores comparativamente aos testes experimentais [Mattuella 2012].

Em terrenos complexos, tais como cumes de morros e taludes as diferenças entre forma, tamanho e rugosidade, dificultam a criação de modelos padrão para cálculos analíticos ou estatísticos. Portanto, justifica-se ainda mais o uso de CFD para a avaliação do escoamento em cada tipo de terreno. Além disso, o efeito de velocidade incremental (*speed-up*) do escoamento de ar acima de cumes de morros, cordilheiras, vales e suas clareiras são bons locais para aproveitar esse efeito na hora de posicionar as turbinas eólicas e otimizar o potencial eólico [Mattuella, 2012].

Loredou-Souza *et al.*, 2004, afirmam que a identificação de variáveis físicas do escoamento, velocidade e turbulência em pontos característicos de um modelo simulado em túnel de vento, com o emprego de um anemômetro com sonda de fio-quente possibilita a identificação das zonas mais propícias para aproveitamentos eólicos. Estes experimentos em túnel de vento estão sujeitos a imperfeições do próprio túnel, dos modelos físicos dos morros e dos erros gerados pelas imprecisões das próprias medições, causando incertezas nos resultados, fato que não ocorre com as simulações numéricas devido ao ambiente (domínio computacional) ser totalmente controlado com os resultados apresentando exata precisão no ponto desejado sem induzir em erro.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação é formada por cinco capítulos principais, sendo o primeiro a introdução desenvolvida até este ponto.

No segundo capítulo apresenta-se o fundamento teórico que envolve o presente estudo e a revisão bibliográfica, onde se apresentam os principais estudos que já foram feitos sobre o assunto do presente trabalho para, assim, identificar quais foram os avanços obtidos e quais as carências ainda persistentes em cada área.

O capítulo terceiro apresenta a metodologia, a qual é explicada e analisada. Primeiramente é introduzida a metodologia experimental realizada por Mattuella, 2012, e posteriormente é realizada toda a metodologia numérica, na qual já se apresentam resultados de qualidade de malha e tratamento da parede para, assim, garantir a fidelidade dos resultados posteriores.

O quarto capítulo contem os resultados do trabalho. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos mediante as simulações numéricas e, posteriormente, são comparados, mediante gráficos, com os resultados experimentais.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, onde são apresentadas os diferenciais e similitudes entre o estudo experimental e numérico e também é demonstrada a metodologia numérica como altamente válida para este tipo de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão teórica que contem uma breve introdução sobre o potencial eólico, o conceito de camada limite atmosférica e a influência da orografia no escoamento (*Micrositing*). Depois são abordados trabalhos relativos à aplicação da dinâmica dos fluidos computacional para a avaliação da camada limite atmosférica em alguns tipos de terrenos.

2.1 POTENCIAL EÓLICO

O vento é resultado de um movimento das massas de ar atmosféricas advindo das variações de pressão existentes em diferentes locais do globo. As variações de pressão são, por sua vez, resultados dos fluxos de radiação solar que incidem na superfície terrestre [Taylor, 2004].

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia mecânica de rotação de um eixo, com o emprego de turbinas eólicas [Aldabo, 2002].

Portanto, a potência disponível P [W] no vento pode ser calculada e é função da velocidade v [m/s] que incide no gerador, a área A [m²] do rotor e a massa específica do ar ρ [kg/m³]. A potência disponível é expressa como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

A potência não pode ser totalmente transformada em potência mecânica no eixo da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula [Castro, 2008]. Assim, existe um máximo teórico para o rendimento da conversão eólica. Segundo Betz [Burton, 2011] uma turbina eólica pode extrair, teoricamente, 16/27 da potência eólica disponível na área de cobertura da turbina, o que leva a eficiência máxima de Betz de 59,3%. 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 [Manwell *et al.*, 2009].

O coeficiente de potência (C_p) é um fator que relaciona a potência disponível e a potência extraída:

$$C_p = \frac{P_m}{P} \quad (2.2)$$

onde P_m [W] é a potência máxima de Betz e P é a potência total da massa de ar que cruza a área do rotor.

2.2 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

O conceito de camada limite foi usado pela primeira vez por Ludwig Prandtl em 1904, no artigo “*Fluid Motion with Very Small Friction*” [Schlichting, 1978]. A partir de um escoamento sobre uma superfície sólida, pode-se observar o surgimento dessa camada pela desaceleração do fluido próximo à superfície.

A partir de um escoamento sobre uma superfície pode-se observar a formação da camada onde há uma desaceleração do fluido na subcamada viscosa próxima à superfície. Assim, as camadas de fluido com menor velocidade exercem uma força

retardadora sobre o próprio fluido, até uma distância onde a velocidade do escoamento não seja perturbada pela superfície [Fox e McDonald, 2001]. Esta região é chamada de camada limite (Figura. 2.1).

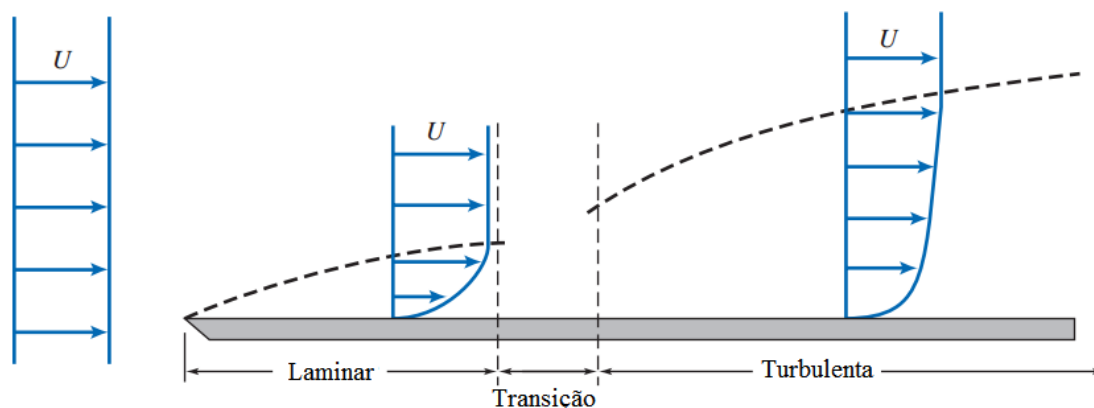


Figura 2.1- Representação da Camada Limite em placa plana [Fox e McDonald, 2001].

Os efeitos de atrito do solo com o ar reduzem ao se aumentar a altura e a partir de certa distância do solo a velocidade do vento não apresenta mais esta redução, sendo chamado de vento geostrófico. Dentro dessa camada limite, em alturas de aproximadamente 150 m, a velocidade do vento pode atingir, sobre uma superfície de terra, até 60% de redução em relação ao vento geostrófico, ou até 30% quando considerado sobre a água [Custódio, 2009].

Já esse conceito aplicado sobre terrenos complexos remonta aos anos 70, quando foram feitos os primeiros experimentos. Tais estudos se iniciaram com a avaliação do comportamento do vento em morros e taludes isolados, realizando testes em túneis de vento. Em 1975, Jackson e Hunt desenvolveram um modelo analítico para determinar o fenômeno da CLA sobre um morro baixo e isolado com rugosidade superficial z_0 , onde esta era uniforme e desprezível em relação à escala de comprimento horizontal e onde não existia separação da CLS. O modelo analítico apresentado previu o comportamento da velocidade do vento e da estrutura da turbulência nestes morros isolados.

2.2.1 PERFIL DE VELOCIDADE

O perfil de velocidade é expresso, principalmente, de duas maneiras:

(a) Mediante a lei da potência de velocidade, é uma equação que representa em escala logarítmica uma reta de declividade p , a qual descreve bem a CLA, com exceção da região próxima à superfície [Loredou-Souza *et al.*, 2004]. Esse perfil é expresso como:

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

O valor do expoente p caracteriza o tipo de terreno, variando de $p = 0,11$ para superfícies lisas até $p = 0,34$ para cidades com prédios altos. Esta lei é amplamente utilizada, porém apresenta alguns problemas em sua aplicação. Por exemplo, não identifica o topo da CLA e a velocidade aumenta indefinidamente [De Freitas Filho, 2012].

(b) O outro modo de expressar o perfil de velocidade é o perfil logarítmico, expresso como:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{l}{k} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

onde l é o comprimento de mistura, k é a constante de von Kármán (com valor 0,4) [Schlichting, 1978]. Essa expressão apresenta um bom ajuste na camada próxima à superfície, mas o ajuste é insuficiente na região superior da CLA. Os parâmetros de corte, u_* , e a rugosidade aerodinâmica z_0 , dependem das características físicas do terreno e do vento.

2.3 MICROSITING

O *micrositing* é definido como qualquer processo que seja empregado para determinar a melhor localização de uma ou mais turbinas eólicas em um terreno. O objetivo fundamental do *micrositing* é encontrar a melhor localização para os aerogeradores de modo a maximizar a energia extraída do conjunto de turbinas.

Portanto, é necessária uma combinação de informações detalhadas do comportamento do vento e da superfície no local onde se pretende fazer a instalação das turbinas. [Manwell *et al.*, 2009].

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre como foram avançando no decorrer do tempo às pesquisas sobre o estudo do escoamento turbulento sobre morros, colinas, taludes, cordilheiras e terrenos complexos. Primeiramente são apresentados os estudos analíticos, posteriormente os estudos experimentais em túnel de vento e em campo e depois são abordados trabalhos numéricos relativos à aplicação da dinâmica dos fluidos computacional para a avaliação das características do perfil de velocidade de vento em alguns tipos de terrenos.

Os trabalhos analíticos mais importantes sobre escoamentos em colinas são desenvolvidos por Jackson e Hunt [1975], quem desenvolveram por meio da teoria de métodos assintóticos, que as equações do movimento podem ser linearizadas, para assim, determinar a mudança do campo de velocidades devida a presença de morros. Posteriormente os efeitos da rugosidade foram incorporados por meio do parâmetro de comprimento de rugosidade z_0 , de modo que o perfil possa ser representado por meio de uma lei logarítmica. Após, a pesquisa foi estendida para casos de morros tridimensionais por Mason e Sykes [1979] e comparadas com medições em campo. O foco principal desses estudos foi prever as características principais do escoamento: fator de aceleração no topo dos morros (*speed-up*), localização do ponto máximo e altura das subcamadas da camada limite e assim, correlacionar esses parâmetros com a geometria do morro e nível de cisalhamento do escoamento incidente. Posteriormente, foi demonstrado que quando o morro torna-se íngreme e gera grandes regiões de recirculação e desprendimento os efeitos não-lineares passam a ser determinantes e portanto o campo de pressão não pode ser mais aproximado pelo escoamento potencial em torno ao morro.

Na década dos 80 continuaram-se realizando pesquisas sobre os estudos iniciados por Hunt, Britter *et al.* [1981] realizou mediante a metodologia experimental uns estudos cujo objetivo principal era avaliar a influencia da rugosidade e a inclinação dos morros sobre a velocidade incremental no topo dos morros. Arya e Shipman [1981] continuaram os estudos com modelos triangulares e cônicas, usaram esses modelos para estudar em túnel de vento com medições mediante anemometria de fio quente. Todos estes testes tinham como intuito a avaliação da dispersão de poluentes, velocidade

incremental, ocorrência de separação, região de recirculação, etc. demonstrando assim a importância de conhecer a CLA na natureza.

Na década seguinte iniciaram-se os estudos numéricos sobre os mesmos fenômenos. Svensson e Häggvist [1990] simularam uma colina bidimensional com o modelo $k-\epsilon$ para resolver o problema de fechamento e consideraram dois termos adicionais para contabilizar o arrasto causado pela vegetação. Hurley [1997] fez uma avaliação de dez modelos de turbulência para escoamentos sobre morros, os resultados apresentaram pequenas diferenças para o campo de velocidades, porém foram observadas divergências na região de maior turbulência. Castro e Apsley [1997] realizaram simulações numéricas para prever o escoamento sobre morros bidimensionais de diferentes inclinações, e os resultados foram comparados com dados provenientes de experimentos em laboratório e em campo.

Nos anos 2000, Loureiro *et al.* [2000a, 2000b] realizaram experimentos em túnel de vento para a caracterização do escoamento ao redor de colinas suaves e abruptas, mas perceberam a limitação do uso da anemometria de fio quente.

Simulações de grandes escalas também foram realizadas por Iizuka e Kondo [2004] para descrever o escoamento turbulento sobre uma colina abrupta bidimensional.

Mais recentemente Loureiro [2008] realizou medições experimentais sobre colinas abruptas e lisas e comparou com resultados numéricos obtidos com o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Concluindo que as velocidades médias e grandezas turbulentas fornecidas pelo modelo foram pobres comparadas com os dados experimentais. Também realizou um estudo sobre colinas abruptas e rugosas usando o modelo de turbulência $k-\omega SST$ e comparando com os dados experimentais concluindo que os resultados numéricos foram satisfatórios.

Mattuella [2012] comparou os resultados obtidos em túnel de vento com cálculo analítico para os mesmos modelos de topografia simples estudados no presente trabalho. Concluiu que os perfis analíticos analisados são em geral maiores que aqueles construídos por medições experimentais. Esta constatação aumenta com o aumento da inclinação do morro e para o escoamento em 3D.

Vecina *et al.* [2015] realizou um estudo dos modelos de turbulência mais adequados para realizar o estudo comparativo entre CFD e medições experimentais em túnel de vento. Os modelos comparados foram o $k-\epsilon$, o $k-\omega SST$ e $k-\omega SST$ com rugosidade, como conclusão obteve que o modelo $k-\omega SST$ representava melhor o

comportamento do escoamento e os valores médios de velocidade. O efeito da rugosidade no presente estudo unicamente gera um efeito de maior atrito na superfície desacelerando o escoamento próximo à superfície, portanto influencia diretamente nos resultados, assim o estudo da malha tem que ter uma relação direta com o tamanho da rugosidade para poder representar essa condição de contorno.

de Freitas Filho [2012] aplicou as ferramentas CFD para análise do potencial eólico em terrenos complexos e comparou com resultados experimentais obtidos em túnel de vento por Mattuella, 2012. Como conclusão obteve que, com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, para pontos de medição perto do cume dos morros a velocidade apresenta um valor médio praticamente idêntico e quanto à região da esteira gerada pelo terreno complexo a diferença relativa média é 19%.

Kothe [2016] realizou um estudo comparativo entre metodologia experimental em túnel de vento e metodologia numérica em CFD utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. O estudo avaliou o comportamento de umas turbinas de eixo vertical em ambas as metodologias. Quanto a metodologia numérica realizou um estudo minucioso da malha de cálculo para poder garantir a qualidade dos resultados, isso foi realizado mediante o estudo da distancia adimensional da parede y^+ , sendo menor que 5 para o modelo de turbulência utilizado. Como conclusão se obteve resultados numéricos com uma diferença máxima de 13% em comparação aos experimentais.

Através dos estudos citados anteriormente se realizou a metodologia do presente estudo, visando assim uma melhor solução do problema. Para a qualidade de malha se usou o tratamento de parede relatado em Kothe, [2016], para as condições de contorno e modelo de turbulência se usaram os descritos em Vecina *et al.* [2016] e de Freitas Filho [2012] e finalmente para comparação dos resultados e validação da metodologia numérica se usaram os dados em Mattuella [2012]. Comprovou-se também a importância da modelagem numérica em problemas de *micrositing* e comparação do CFD frente a outras metodologias.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo inicia explicando brevemente como foram realizadas as medições experimentais. Posteriormente, introduz a metodologia numérica, uma vez que essa depende totalmente do modo de realização dos experimentos.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram conduzidos no túnel de vento do Prof. Joaquin Blessmann na Universidade Federal do Rio Grande do Sul [Blessmann, 1982] por Mattuella, 2012. O túnel de vento é de circuito fechado e foi configurado e equipado para representar a formação da CLA. A seção de testes possui dimensões de 1,20 m de largura 0,90 m de altura e 2,90 m de comprimento, sem contabilizar os 7,12 m anteriores à seção de testes que são necessários para o desenvolvimento da CLA.

As medições de velocidade e de intensidade de turbulência foram tomadas através de um anemômetro de fio-quente. Esse tipo de equipamento consiste de um filamento que, resfriado pelo escoamento de ar incidente, cria uma diferença de tensão que é decodificada em dados de velocidade. A incerteza de medição desse equipamento é inferior a 5% quando comparada aos valores reais (CALIFORNIA REGIONAL WIND ENERGY FORECASTING SYSTEM DEVELOPMENT, 2006).

3.1.1 MODELOS ANALÍTICOS DE MORROS ESTUDADOS

Os oito modelos analíticos para os testes são constituídos a partir de quatro geometrias genéricas de morros com simetria axial. Quatro deles possuem seção transversal constante extrudada na direção normal à corrente livre e serão chamados de bidimensionais (2D). Os quatro modelos restante são gerados a partir da revolução das quatro geometrias adotadas, resultando em modelos com simetria radial que serão chamados de tridimensionais (3D). Todos os modelos possuem a mesma altura, embora apresentem diferenças geométricas.

O experimento foi desenvolvido com os modelos de Ferreira *et al.*, 1995, realizados em escala 1:1000. Estes morros são chamados de A, B, C e D e são classificados segundo sua declividade α de 25°, 32°, 52° e 64° respectivamente. Na Tabela 3.1 são apresentadas as dimensões dos morros bidimensionais.

Tabela 3.1 – Dimensões dos modelos em escala bidimensionais.

Modelo	Largura (L) [mm]	Comprimento (C) [mm]	Altura (h) [mm]
Morro A	784,98	1290	150
Morro B	561,74	1290	150
Morro C	280,86	1290	150
Morro D	140,44	1290	150

Na Tabela 3.2 mostram-se as dimensões dos morros tridimensionais.

Tabela 3.2 – Dimensões dos modelos em escala tridimensionais.

Modelo	Base (b) [mm]	Altura (h) [mm]
Morro A	800	150
Morro B	600	150
Morro C	300	150
Morro D	150	150

As seguintes fotografias (Figura 3.1 até Figura 3.4) mostram os modelos de morros situados na seção de testes do túnel de vento.



(a)



(b)

Figura 3.1 – Modelo analítico A - $\alpha = 25^\circ$: (a) 2D e (b) 3D [Mattuella, 2012].



Figura 3.2 - Modelo analítico B - $\alpha = 32^\circ$: (a) 2D e (b) 3D [Mattuella, 2012].



Figura 3.3 - Modelo analítico C - $\alpha = 52^\circ$: (a) 2D e (b) 3D [Mattuella, 2012].

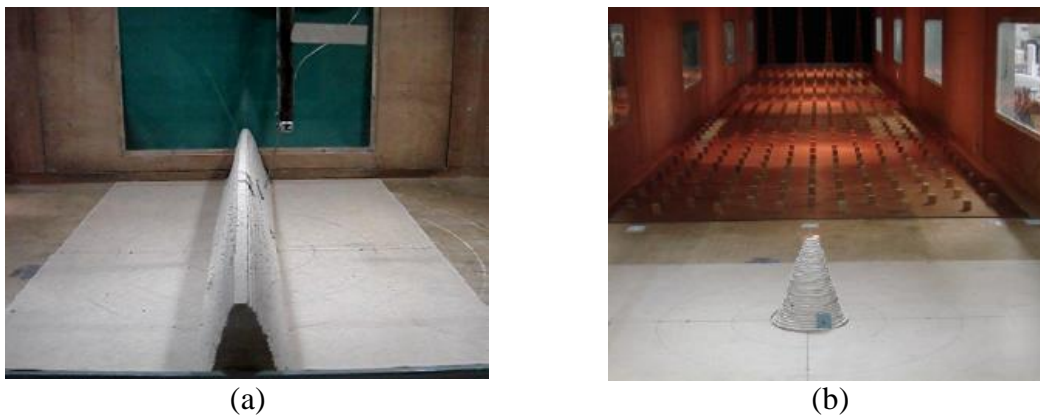


Figura 3.4 - Modelo analítico D - $\alpha = 64^\circ$: (a) 2D e (b) 3D [Mattuella, 2012].

Os modelos apresentados anteriormente foram analisados individualmente no túnel de vento para posteriormente serem comparados os resultados entre eles.

3.1.2 ENSAIOS EM TUNEL DE VENTO

As medições experimentais do escoamento em túnel de vento dos morros isolados simétricos foram obtidas para ventos com perfil de velocidades $p = 0,11$ (área plana e sem rugosidade) e $p = 0,23$ (área com pouca densificação) para os modelos A, B, C e D, tanto para os 2D como para os 3D. Os dados de medição foram coletados a partir do centro dos cumes dos morros em diferentes posições sobre uma linha imaginária vertical situada no centro do túnel. Em Mattuella, 2012 são apresentadas as tabelas com os resultados obtidos desta bateria de testes.

3.2 METODOLOGIA NUMÉRICA

Os morros foram simulados numericamente através do *software* comercial de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) *ANSYS Fluent 13.0* para, assim, obter-se os resultados de velocidade e intensidade de turbulência e em seguida serem comparados com os resultados experimentais.

O *software* resolve as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, chamado comumente de RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes Equations*) e as equações de conservação de massa e balanço de momento.

Com as simulações realizadas pretende-se além de avaliar o comportamento do perfil de velocidades no cume dos morros, estabelecer uma metodologia para posteriormente realizar estudos em terrenos complexos.

3.2.1 DOMÍNIOS COMPUTACIONAIS

Os modelos computacionais dos morros foram construídos a partir das coordenadas geométricas dos modelos utilizados nos testes experimentais. Para a modelagem foi utilizado um *software* de modelagem 3D. As Figuras 3.5. a 3.8 ilustram esses modelos.

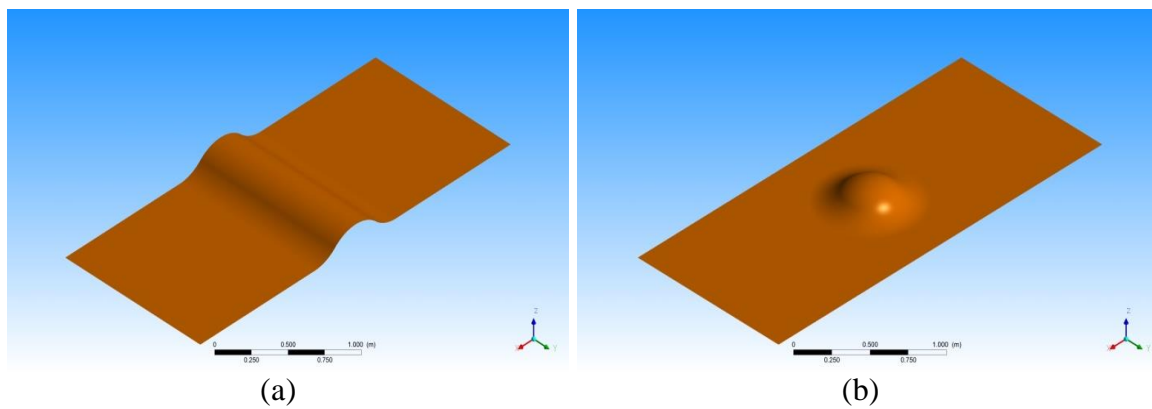


Figura 3.5 - Modelo computacional A - $\alpha = 25^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.

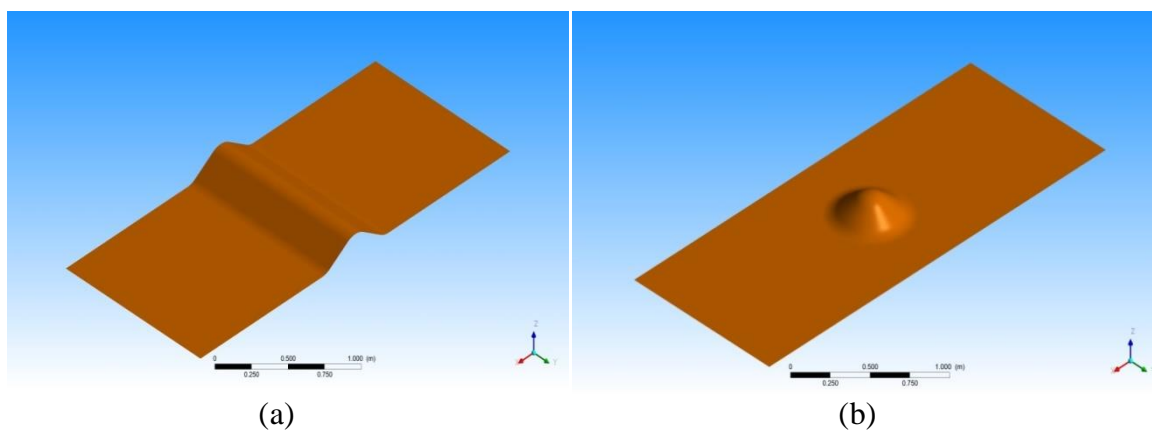


Figura 3.6 - Modelo computacional B - $\alpha = 32^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.

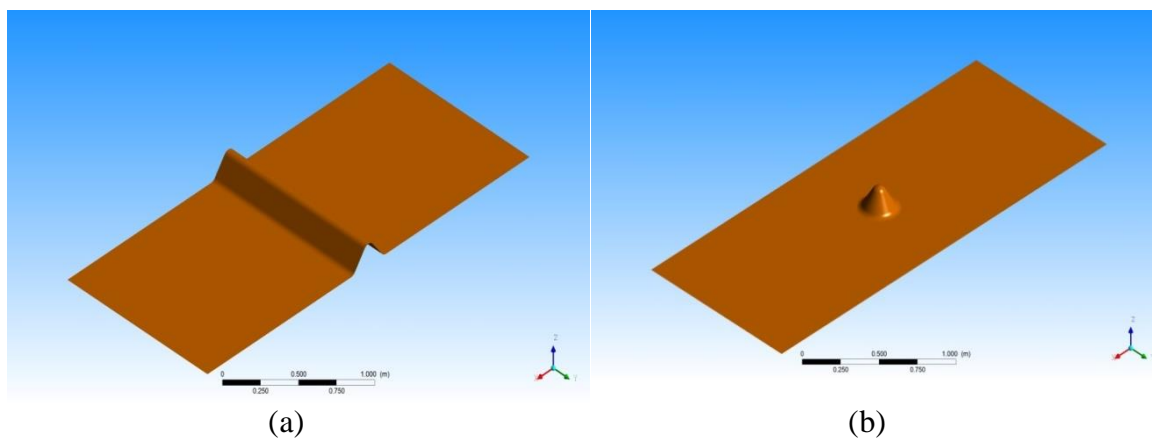


Figura 3.7 - Modelo computacional C - $\alpha = 52^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.

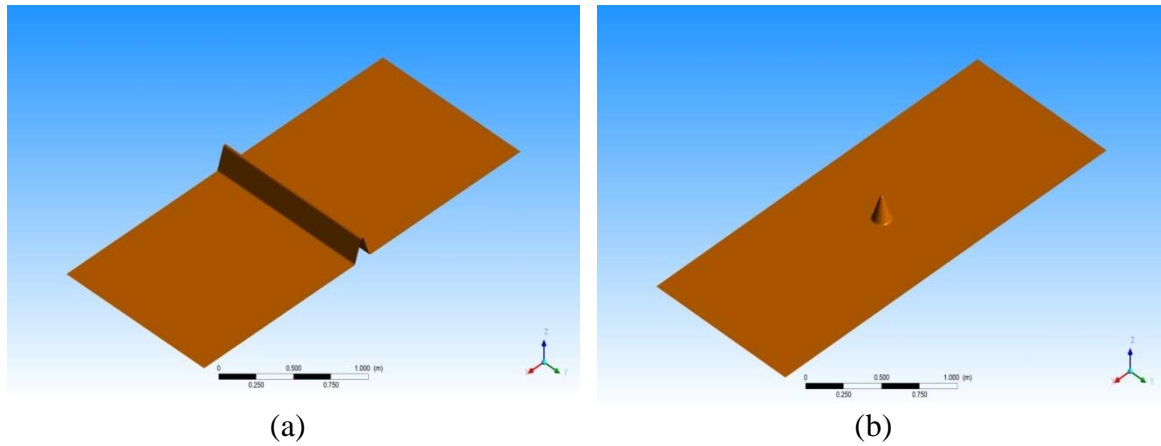


Figura 3.8 - Modelo computacional D - $\alpha = 64^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.

3.2.2 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

O domínio computacional foi discretizado em uma malha de volumes finitos através do software *ANSYS-ICEM 13.0*. Todos os domínios numéricos possuem as mesmas dimensões da seção de testes do túnel: 1,20 m de largura, 0,90 m de altura e 2,90 m de comprimento. Os morros foram posicionados no centro do domínio, na superfície inferior.

A malha de cálculo é composta por volumes finitos tetraédricos e foi intencionalmente refinada próximo à superfície do solo e dos morros através da aplicação uma região de elementos de dez camadas prismáticas. Um estudo de independência de malha foi conduzido através da geração de quatro malhas com diferente quantidade de volumes, quatro malhas para uma geometria 2D e quatro malhas para uma das geometrias 3D. A Tab. 3.3 apresenta os detalhes das malhas criadas para cada domínio 2D e 3D estão dispostos a seguir.

Tabela 3.3 – Número de elementos das malhas dos domínios dos modelos 2D e 3D.

	Nº ELEMENTOS MODELO 2D	Nº ELEMENTOS MODELO 3D
MALHA 1	3.008.872	1.906.478
MALHA 2	6.857.103	5.055.913
MALHA 3	10.378.507	9.378.507
MALHA 4	12.479.658	11.384.978

3.2.2.1 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MALHA

O parâmetro adotado para avaliação da qualidade da malha foi a velocidade do vento pontual a uma distância de $3,5 \cdot 10^{-5}$ m acima da topografia analisada, uma vez que nessa região há um incremento na velocidade do escoamento. Para a avaliação dos domínios computacionais, bidimensional e tridimensional, foi adotado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST em regime permanente, e simulado em 3D, com um perfil de velocidade constante de 10 m/s.

As malhas de cálculo, tanto para os modelos 2D, como para os modelos 3D foram geradas utilizando os mesmos parâmetros de tamanho dos elementos e dimensões da camada prismática. A Figura 3.9 (a) apresenta uma imagem da malha do modelo 2D. A Figura 3.9 (b) mostra em detalhes a camada prismática, próximo à superfície. A Figura 3.10 (a) e 3.10 (b) apontam respectivamente as mesmas imagens, com o modelo 3D de morro.

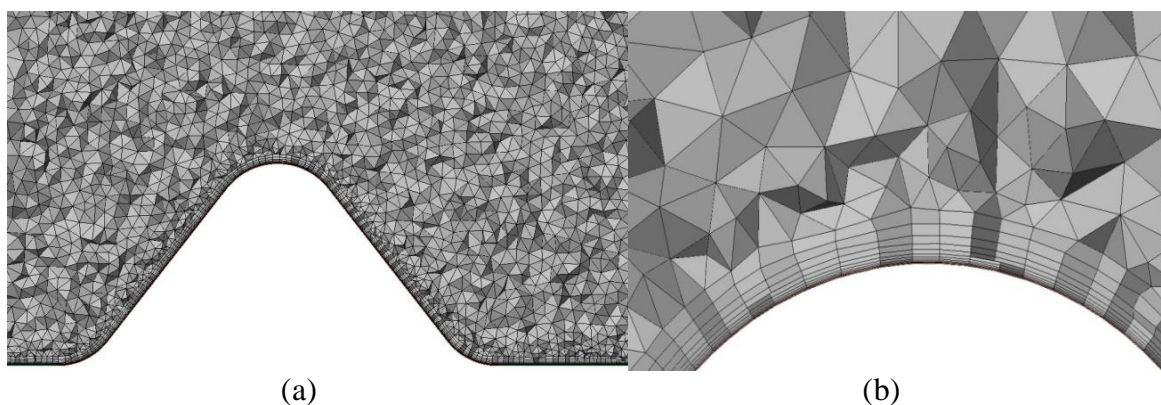


Figura 3.9 - Malha modelo B – $\alpha = 32^\circ$ 2D: (a) tetraédrica e (b) Detalhe da camada prismática.

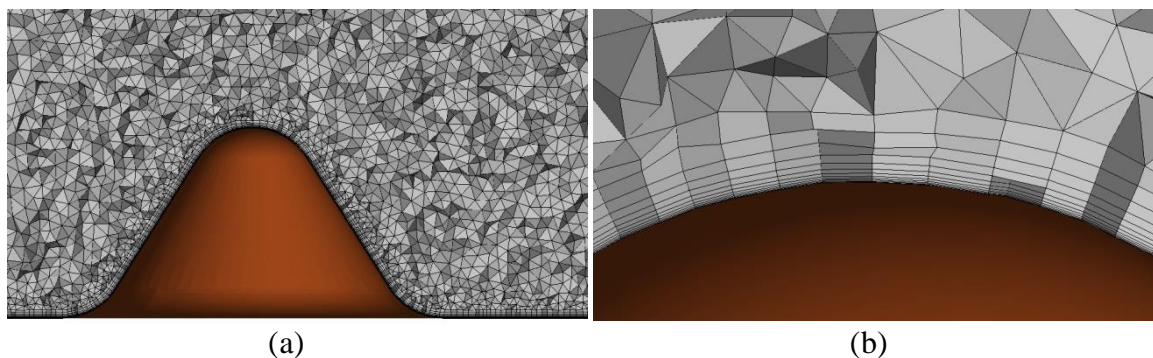


Figura 3.10 - Malha modelo – $\alpha = 32$ 3D: (a) tetraédrica e (b) Detalhe da camada prismática.

A Tabela 3.4 apresenta valores de velocidade do escoamento no ponto $x, y, z = (0, 0, 200)$ mm para os modelos e as variações nesse ponto para cada caso, nos modelos bidimensional e tridimensional.

Tabela 3.4 – Resultados da qualidade de malha.

	VELOCIDADE MORRO 2D [M/S]	ΔV %	VELOCIDADE MORRO 3D [M/S]	ΔV %
MALHA 1	11,1804	-	9,5519	-
MALHA 2	10,9856	1,7423	9,3651	1,9556
MALHA 3	10,9598	0,2348	9,3353	0,3182
MALHA 4	10,9502	0,0875	9,3301	0,0557

Os resultados do estudo da qualidade apontam que a máxima variação da velocidade nesse ponto do domínio é inferior a 2% para todos os casos. Apesar disso, optou-se pela densidade de elementos equivalente a da malha 3 que apresentou a melhor relação custo-benefício entre o tempo computacional e a precisão dos resultados. A malha 4, por sua vez, foi descartada por não apresentar um aumento significativo na precisão dos resultados que justificasse seu aumento na demanda computacional.

3.2.2.2 TRATAMENTO PRÓXIMO DA PAREDE (*NEAR-WALL TREATMENTS*)

Os escoamentos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes [Blocken *et al.*, 2007]. Como esperado, o campo de velocidades médias é afetado pela condição de não deslizamento que deve ser satisfeita na parede. No entanto, a turbulência também é alterada pela presença da parede de formas não triviais. Em regiões muito próximas à parede, o amortecimento viscoso reduz a flutuação da velocidade tangencial, enquanto o bloqueio cinemático reduz as flutuações normais. Em

relação às zonas distantes da parede, a turbulência é rapidamente aumentada pela produção de energia cinética turbulenta, devido aos grandes gradientes de velocidade.

A modelagem da região próxima à parede tem impacto significativo na precisão das soluções numéricas, na medida em que as paredes são a principal fonte de vorticidade e turbulência. Isso ocorre, porque é na região próxima à parede que as variáveis da solução apresentam os maiores gradientes e a transferência de momento e outros transportes escalares ocorrem mais acentuadamente. Por conseguinte, a caracterização exata do escoamento na região próxima à parede é determinante na obtenção de previsões adequadas de escoamentos turbulentos nessas regiões.

Numerosos experimentos mostraram que a região próxima da parede pode ser subdividida em três camadas. Na camada mais interna, chamada de subcamada viscosa, o escoamento é quase laminar e a viscosidade molecular desempenha um papel dominante na transferência momento, calor ou massa. Na camada externa, chamada de camada totalmente turbulenta, a turbulência desempenha um papel dominante. Finalmente, existe uma região intermediária entre a subcamada viscosa e a camada totalmente turbulenta onde os efeitos da viscosidade molecular e da turbulência são igualmente importantes. A Figura 3.11 ilustra essas subdivisões da região de parede próxima, traçadas em coordenadas semi-logarítmicas [ANSYS, 2013a].

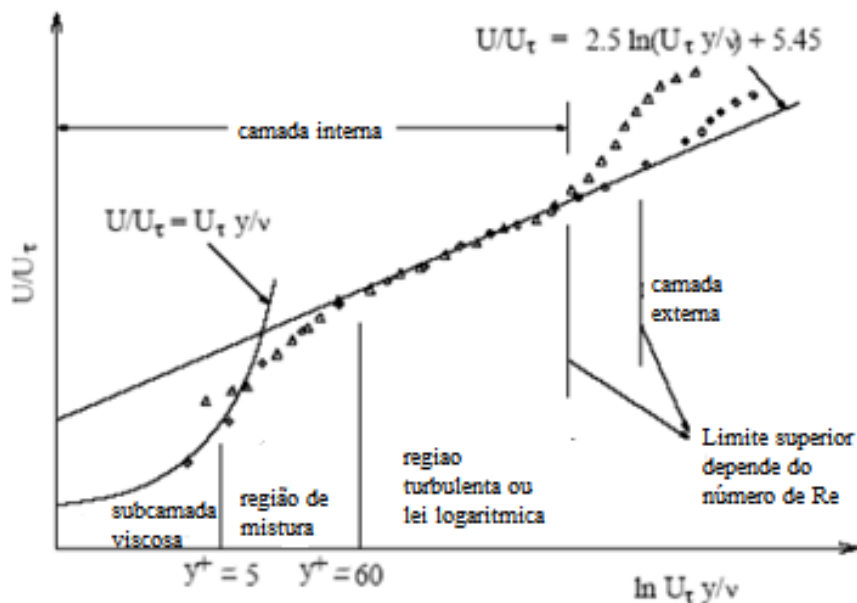


Figura 3.11 - Subdivisões da região da parede dependentes do y^+ [ANSYS, 2013a].

De forma a captar esses efeitos viscosos, no caso em que a malha não esteja refinada o suficiente para permitir resolução completa do escoamento, os modelos de turbulência são modificados para permitir o uso de funções matemáticas que modelam a subcamada viscosa. No presente trabalho, foi realizado um refinamento da malha próximo à parede que possibilita ao código resolver completamente o escoamento nessa região. Baixos valores de y^+ Equação (3.1) garantem a resolução completa do escoamento, quando seu valor é próximo ou menor que 1 na região de interesse (por exemplo na região próxima às paredes) e menor que 3 no restante do domínio de cálculo. Esse parâmetro é definido na Equação (3.1).

$$y^+ = \frac{\rho u_t y}{\mu} \quad (3.1)$$

onde u_t chama-se velocidade de fricção e é definida pela Equação (3.2).

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3.2)$$

Um estudo do y^+ foi realizado para garantir que sejam resolvidas as equações na subcamada viscosa de cada um dos domínios simulados. As Figuras 3.12 a 3.15 mostram os valores obtidos de y^+ na superfície do solo e dos morros estudados.

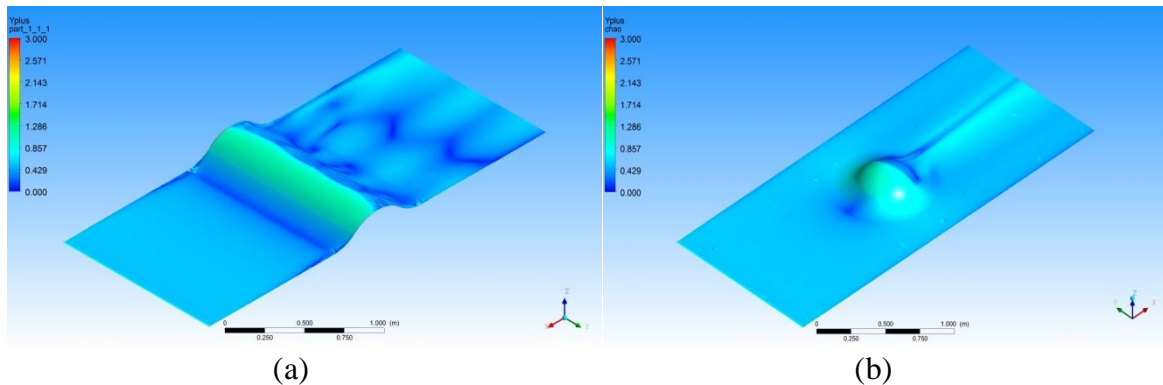
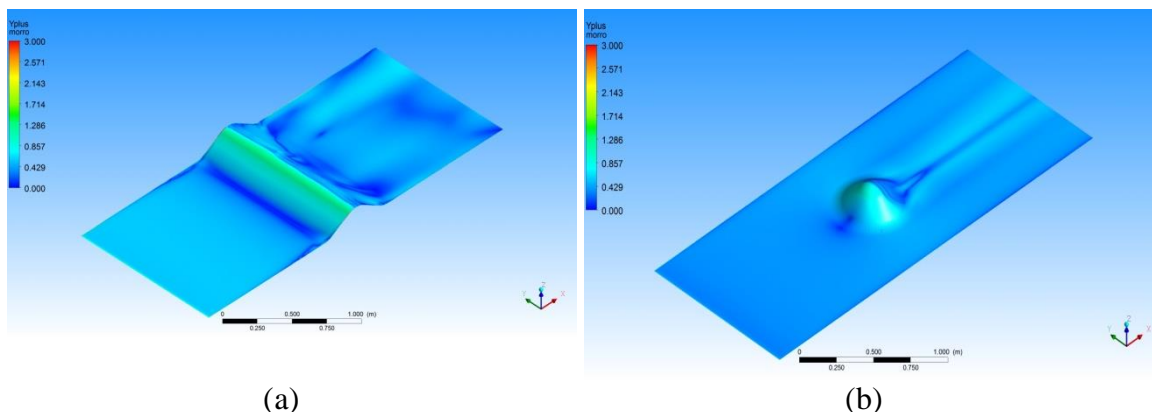
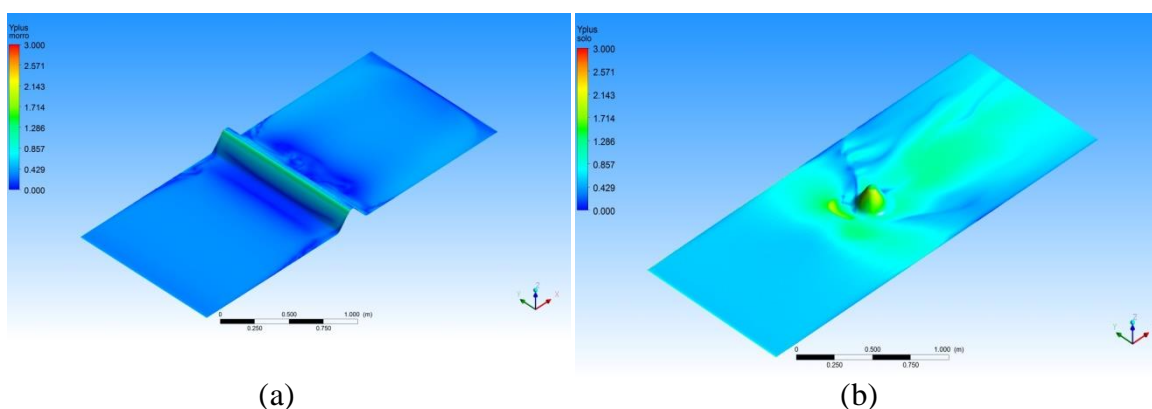


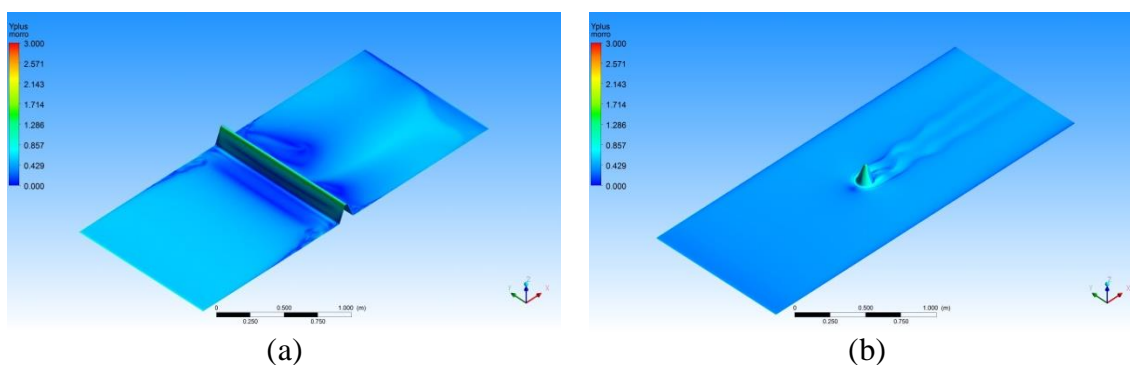
Figura 3.12 - Campo de y^+ na superfície do morro A – $\alpha = 25^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.



(a) (b)
 Figura 3.13 - Campo de y^+ na superfície do morro B – $\alpha = 32^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.



(a) (b)
 Figura 3.14 - Campo de y^+ na superfície do morro C – $\alpha = 52^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.



(a) (b)
 Figura 3.15 - Campo de y^+ na superfície do morro D – $\alpha = 64^\circ$: (a) 2D e (b) 3D.

Em todos os casos considerados, o máximo valor de y^+ é igual ou próximo a 1. Assim, em todas as simulações pode-se garantir que a subcamada viscosa será completamente resolvida pelo código, sem o uso adicional de modelagens matemáticas.

3.2.3 VENTO SIMULADO

As condições de vento na entrada foram modeladas utilizando uma *User Define Function (UDF)*, APÊNDICE 1. Esta metodologia foi aplicada para representar adequadamente o perfil de velocidades na entrada do domínio com as mesmas características do perfil de entrada dos experimentos no túnel de vento. O perfil vertical de velocidades médias emprega a lei de potência, no qual o valor da velocidade varia em função da altura z conforme a Equação (3.3).

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (3.3)$$

De acordo com os dados cedidos pelo LAC, a parte inferior do túnel possui características de rugosidade tais que, na lei da potência, expressam-se através do valor de $p = 0,11$ ou $0,23$. Os valores dessa variável dependem da posição e do número de elementos de rugosidade sobre o solo. Na parte superior, onde não há elementos de rugosidade, é utilizado um valor de $p = 0,11$ para obter o perfil de velocidades. A Equação (3.4) modela o perfil de velocidade para o caso de maior rugosidade – doravante chamado de “terreno rugoso” – a Equação (3.5) modela o perfil de velocidade para o caso de menor rugosidade – denominado “terreno liso” – e a Equação (3.6) modela o perfil de velocidades na parte superior do domínio, que é comum para todos os casos.

$$\frac{V}{V_{(0,8)}} = 1 - \left| \left(\frac{z - 0,8}{0,8} \right)^{0,23} \right|, 0 < z \leq 0,8 \quad (3.4)$$

$$\frac{V}{V_{(0,8)}} = 1 - \left| \left(\frac{z - 0,8}{0,8} \right)^{0,11} \right|, 0 < z \leq 0,8 \quad (3.5)$$

$$\frac{V}{V_{(0,8)}} = 1 - \left| \left(\frac{z - 0,8}{0,8} \right)^{0,11} \right|, 0,8 < z \leq 0,9 \quad (3.6)$$

Segundo a NBR 6123, o expoente de $0,11$ na Equação (3.3) corresponde a superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na

direção e sentido do vento incidente, como por exemplo: mar calmo, lagos e rios pântanos sem vegetação. O expoente 0,23 é equivalente à categoria III-IV, onde a categoria III corresponde a terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas, tipo granjas e casas de campo. Excetuam-se matas, fazendas com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distancia do vento, com casas baixas e esparsas, com altura média dos obstáculos igual a 3 m. A categoria IV corresponde a terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizados, tais como zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria de terreno também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na categoria V.

A Figura 3.16 apresenta um gráfico de comparação dos perfis de velocidades representados pelas Equações (3.4) e (3.5) e o perfil obtido das medições em túnel de vento.

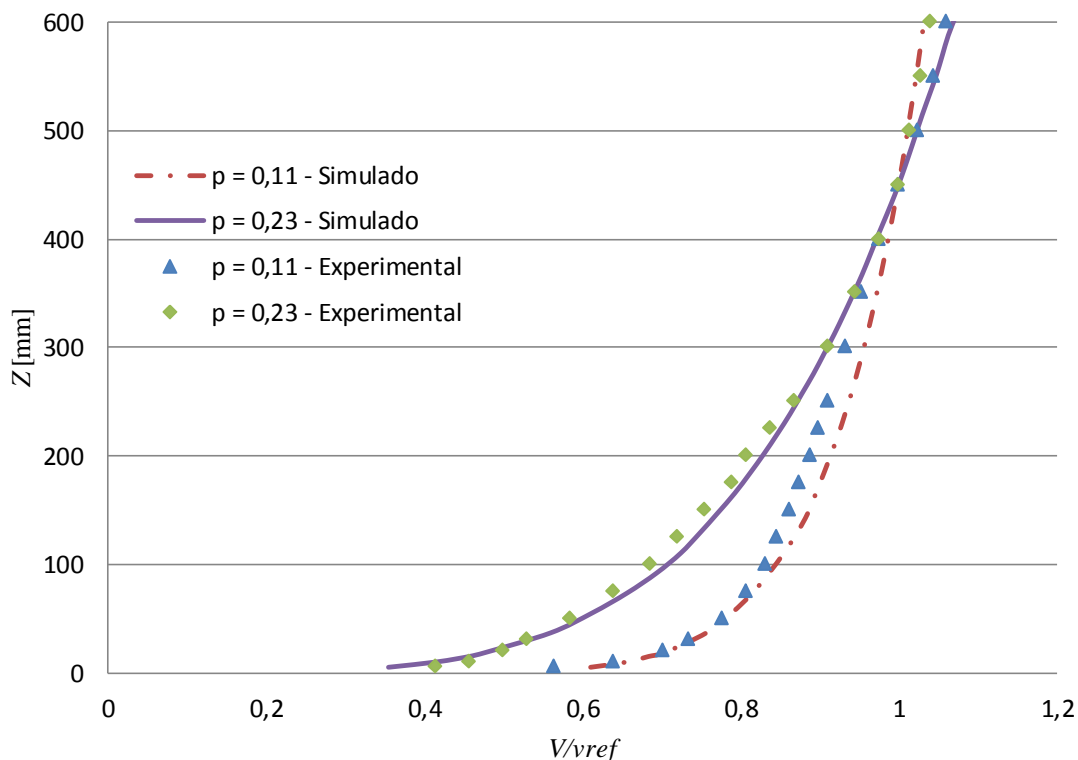


Figura 3.16 – Perfis de velocidade de entrada.

Na Figura 3.16 percebe-se que os dados experimentais com os resultados dos perfis simulados apresentam concordância no formato do perfil de velocidade e a diferença máxima entre os pontos de medição e o perfil simulado são de 2%.

3.2.4 INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA

A intensidade da turbulência, também chamada de turbulência, é definida pela razão da velocidade turbulenta em um determinado ponto do domínio e a velocidade média do escoamento no mesmo ponto. A Equação (3.7) define este parâmetro.

$$I_u = \frac{u'}{U} \quad (3.7)$$

onde u' é o valor RMS das flutuações de velocidade turbulenta e U é a velocidade média (média de Reynolds).

Se a energia cinética turbulenta k é conhecida, u' pode ser calculada segundo a Equação (3.8):

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (3.8)$$

U pode ser calculada a partir das três componentes de velocidade média, pela Equação (3.9):

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (3.9)$$

De maneira a definir as condições de contorno para uma simulação de CFD, é frequentemente necessário estimar a intensidade de turbulência na entrada do domínio. O modo mais adequado para fazer esta estimativa com precisão é através de medições ou de dados já existentes. A seguir estão descritos três exemplos de estimativas comumente adotadas de intensidade de turbulência de entrada:

(a) Caso de alta turbulência: escoamento de alta velocidade no interior de geometrias complexas, como trocadores de calor e máquinas rotativas (turbinas e

compressores). A intensidade de turbulência está compreendida, tipicamente, entre 5 e 20%.

(b) Caso de turbulência média: escoamento no interior de dispositivos menos complexos, como tubos grandes, dutos de ventilação, ou escoamentos de baixa velocidade (baixo número de Reynolds). Tipicamente, a intensidade de turbulência está compreendida entre 1 e 5%.

(c) Caso de baixa turbulência: escoamento gerado por um corpo externo movendo-se em relação a um fluido inerte, como a maioria dos escoamentos externos. Túneis de vento de alta qualidade também podem alcançar valores de intensidade de turbulência próximos ou abaixo de 1%. [ANSYS, 2013b].

A Figura 3.17 apresenta os resultados experimentais do perfil de intensidade de turbulência na entrada em comparação com os perfis de intensidade de turbulência obtidos através das simulações numéricas.

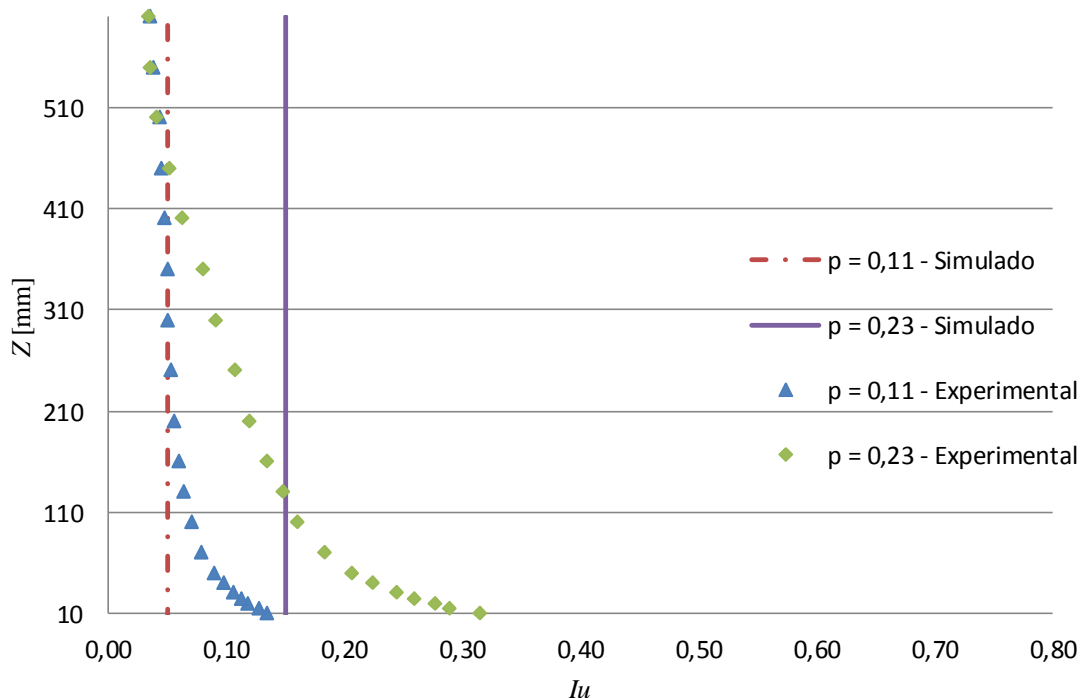


Figura 3.17 – Perfis de intensidade de turbulência de entrada.

A diferença entre os perfis experimentais e numéricos se devem a uma limitação do *software ANSYS Fluent*. O código permite apenas o uso de valores constantes de intensidade turbulenta, não sendo permitido utilizar uma UDF que contabiliza as variações da intensidade de turbulência na entrada do domínio. Portanto, foi adotado,

nas simulações, um valor médio de intensidade de turbulência obtido de cada medição experimental.

3.2.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

O comportamento do escoamento do ar no interior do domínio computacional é influenciado diretamente pelas condições de contorno.

O fluido foi modelado como sendo ar nas condições ideais de temperatura e pressão com massa específica de $1,225 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade cinemática de $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

O perfil de velocidade definido pela Equação (3.3) foi utilizada como condição de entrada, implementada através da importação desta equação como uma UDF na direção x . As componentes restantes de velocidade são nulas. A intensidade de turbulência empregada na entrada do domínio computacional foi de 5% para o caso de $p = 0,11$ e 15% para o caso de $p = 0,23$. Para a condição de saída, a superfície correspondente foi modelada como uma pressão manométrica de saída nula, simulando desta forma a pressão atmosférica.

Todas as paredes restantes do domínio foram caracterizadas pela condição de não deslizamento. A rugosidade superficial sobre as superfícies do domínio foi considerada nula.

3.2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA

A observação do movimento dos fluidos mostra a existência de dois regimes de escoamento que apresentam características diversas, e que foram denominados respectivamente de regime laminar e regime turbulento. No comportamento das partículas do fluido em escoamento residem as diferenças que caracterizam estes regimes.

No caso de estudo, as tensões tangenciais adicionais, criadas pela desordenação da corrente, não são suficientes para evitar as flutuações de velocidade, e o escoamento torna-se turbulento. A maior ou menor estabilidade de uma corrente fluida pode ser caracterizada por um fator que depende necessariamente da massa específica do fluido,

de sua viscosidade, da distância da parede e do gradiente de velocidade através da seção transversal da corrente.

Este fator é o número de Reynolds, número adimensional que caracteriza a maior ou menor influência da viscosidade sobre o regime do escoamento. Para escoamentos internos (duto circular), sob condições normais, a transição para a turbulência ocorre a números de Reynolds, Re , próximos a 2.300, embora experimentos já tenham sido capazes de manter o regime laminar com Re próximos a 100.000, em situações extremamente controladas [Fox e McDonald, 2004].

Dessa forma, no presente estudo, que envolve altas velocidades, irregularidades, tridimensionalidade, ocorrerá o regime turbulento.

3.2.5.1 EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

As equações de Navier-Stokes (N-S) são um conjunto de expressões matemáticas capazes de descrever todos os aspectos do movimento dos fluidos. Por simplicidade, as equações presentes neste trabalho são simplificadas à um modelo de fluido Newtoniano incompressível não sujeito a forças de campo externas e sem variação de temperatura.

A Equação (3.10) é a Equação da Continuidade, que representa o princípio da conservação da massa, resolvida em conjunto com o Princípio de Balanço de Momento, apresentada na Equação 3.11. As Equações (3.12) e (3.13) representam relações adicionais que foram separadas do conjunto original por razões de clareza.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.10)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (t_{ij}) \quad (3.11)$$

onde a Equação (3.12) e (3.13) complementam as equações anteriores,

$$t_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (3.12)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.13)$$

Nessas equações, u_i e u_j são os campos de velocidade nas direções principais, p é o campo de pressão, t é o tempo, μ é a viscosidade dinâmica e ρ é a massa específica do fluido.

Devido às características não lineares das equações governantes e à complexidade das soluções procuradas, casos de escoamentos mais complexos permanecem sem solução analítica. Dessa forma, a solução do sistema de equações apresentado vem sendo buscada através de métodos numéricos que vão desde a Simulação Numérica Direta (DNS), onde todas as escalas espaciais e temporais são efetivamente resolvidas, até os diferentes métodos de modelagem da turbulência [Möller e Silvestrini, 2004], que serão tratados no capítulo seguinte.

3.2.5.2 MODELOS DE TURBULÊNCIA

As Equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds requerem a utilização de modelos de turbulência a fim de resolver problemas de fechamento de equações [Maliska, 2004]. As equações do método RANS derivam-se da teoria da estabilidade dos escoamentos, proposta originalmente por Osborne Reynolds, em 1895. A partir das equações de Navier-Stokes, Reynolds propôs modelar o escoamento turbulento como um escoamento principal afetado por pequenas perturbações que, aumentando com o tempo, favorecem a ocorrência da transição de regime laminar para o regime turbulento. Assim, tratou de decompor as variáveis do deslocamento do fluido em componentes médias e de perturbação. Isso deu origem a novos termos incógnitos nas equações básicas de Navier-Stokes, produzindo um problema com mais incógnitas do que equações [Moller e Silvestrini, 2004]. Os modelos de turbulência visam resolver o problema de fechamento decorrente da metodologia RANS.

Segundo Vecina *et al.*, 2015, foram utilizados dois modelos de turbulência para resolver o problema de fechamento das equações de Navier-Stokes. Os resultados numéricos obtidos para ambos os casos 2D e 3D do modelo de morro A, mostram que os resultados do modelo $k-\omega$ SST, apresentam melhor concordância com os dados

experimentais do perfil de velocidades quando comparados aos resultados fornecidos pelo modelo $k-\varepsilon$.

O modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Shear-Stress Transport*), desenvolvido por Mentor em 1994 [ANSYS, 2009], foi aplicado no presente trabalho pelo motivo apresentado. Este modelo adiciona uma equação para a energia cinética turbulenta k , e uma equação para a taxa de dissipação específica ω , a qual é a razão entre a taxa de dissipação e a energia cinética turbulenta ($\omega = \varepsilon/k$). Este modelo utiliza uma mescla de funções para aplicar o modelo original $k-\omega$ em regiões próximas a paredes e outros obstáculos, devido a sua capacidade de lidar com altos gradientes de pressão, enquanto utiliza o modelo $k-\varepsilon$ em regiões distantes das paredes em função de se beneficiar da robustez deste método nesta região.

A energia cinética da turbulência é denotada pela variável k (Equação 3.14) e foi proposta em 1945 também por Prandtl, baseada nas flutuações de velocidade nas três dimensões:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (3.14)$$

A formulação do modelo $k-\omega$ reescrita por Wilcox, em 1988, segue nas Equações. (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) e são, respectivamente, a viscosidade turbulenta, a energia cinética da turbulência, a taxa de dissipação específica e os coeficientes de fechamento.

$$\mu_T = \rho k / \omega \quad (3.15)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.16)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.17)$$

$$\alpha = 5/9, \quad \beta = 3/40, \quad \beta^* = 9/100, \quad \sigma = 1/2, \quad \sigma^* = 1/2 \quad (3.18)$$

Menter *et al.*, 2003, ao definir o modelo $k-\omega$ SST, define a energia cinética turbulenta, k , como obtida pela seguinte equação de balanço:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{\tilde{P}_k}{\rho} - \beta^* k \omega \quad (3.19)$$

onde k é a energia cinética da turbulência, ν é a viscosidade cinemática, ν_t é a viscosidade turbulenta, ω é a taxa de dissipação específica, conforme proposto por Kolmogorov, σ_ω é uma constante do modelo, e P_k é definido como

$$P_k = \rho \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho k \omega) \quad (3.20)$$

sendo a taxa de dissipação específica, ω , definida através da equação de balanço:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \sigma_\omega \nu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3.21)$$

S representa um termo fonte. A função de mistura, F_1 , é:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega \psi}, \frac{500\nu}{\psi^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} \psi^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (3.22)$$

Na Eq. (3.22), ψ é a distância mais próxima à parede. $CD_{k\omega}$ é calculado por:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} k \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (3.23)$$

A viscosidade turbulenta é calculada por:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (3.24)$$

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

$$F_2 = \tanh \left\{ \left\{ \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega \psi}, \frac{500\nu}{\psi^2 w} \right)^2 \right\} \right\} \quad (3.25)$$

As demais constantes das equações do modelo provem dos modelos de origem, mas sofrem algumas alterações, os valores das quais são:

$$\begin{aligned} \beta^* &= 9/100; \alpha_1 = 5/9; \beta_1 = 3/40; \sigma_{k1} = 0,85; \\ \sigma_{\omega1} &= 0,5; \beta_2 = 0,0828; \sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega2} = 0,856 \end{aligned} \quad (3.26)$$

As funções de mistura F_1 e F_2 , cujos valores variam entre zero e um, promovem a alteração do modelo. F_1 é responsável pela troca entre as equações de transporte e F_2 provoca a alternância entre as equações para a viscosidade turbulenta.

4 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos seguindo a metodologia explicitada anteriormente. Primeiramente, apresentam-se os resultados obtidos mediante as simulações numéricas. Estes incluem os campos de velocidade na seção média do domínio de cálculo, onde é possível visualizar o comportamento do escoamento de ar desde a entrada do domínio até a saída passando pelo morro de estudo. Posteriormente, campos de energia cinética turbulenta são apresentados, dos quais é obtida a intensidade de turbulência.

Após a apresentação dos resultados numéricos, é feita uma comparação entre estes dados e dados experimentais. As variáveis comparadas são os perfis de velocidade no cume dos oito morros em questão para cada perfil de entrada e a intensidade de turbulência nestes mesmos pontos de estudo.

4.1 CAMPO DE VELOCIDADES

Esta seção apresenta os resultados para os campos de velocidade no plano médio longitudinal do domínio. A entrada corresponde ao lado esquerdo do domínio em todas as figuras subsequentes, onde o perfil de velocidade prescrito foi aplicado. A presença

do morro causa uma aceleração do escoamento de ar. Este efeito é a principal característica a ser avaliada neste estudo.

As figuras estão ordenadas da seguinte forma: primeiramente, o morro A é apresentado em sua versão 3D para ambos os perfis de velocidade: $p = 0,11$ e $p = 0,23$, seguido por sua versão 2D, novamente para ambos os perfis de velocidade. Os morros B, C e D são então apresentados, seguindo a mesma ordem descrita para o morro A.

A Figura 4.1 apresenta os quatro casos do morro A, como se podem visualizar nas imagens ambos os casos com o perfil de velocidade de expoente $p = 0,11$ que representa o terreno liso apresentam uma maior aceleração do escoamento na região superior do morro que com o perfil que representa o terreno rugoso. Também se pode observar que os modelos 2D apresentam uma maior aceleração do escoamento na região acima do morro que nos modelos 3D. Em quanto à esteira e a recirculação a jusante do morro, percebe-se mediante as imagens que os casos 3D tem um comprimento da esteira menor que os casos 2D e que os casos lisos também tem uma esteira menor que os casos rugosos. Nos quatro casos estudados do morro de inclinação 32° a altura da esteira é sempre igual à altura do morro.

A Figura 4.2 apresenta os diversos casos de estudo do morro B, as imagens seguintes permitem visualizar a mesma situação que aconteceu no morro A, os casos com o perfil de velocidade de expoente $p = 0,11$ apresentam uma maior aceleração do escoamento no topo do morro que com o perfil $p = 0,23$. Também se observa que os modelos bidimensionais apresentam uma maior aceleração do escoamento na região acima do morro que nos modelos tridimensionais. Referente à recirculação a jusante do morro, se observa que os casos 3D tem um comprimento da esteira menor que os casos 2D e que os casos lisos também tem uma esteira menor que os casos rugosos. A altura da esteira para os modelos bidimensionais também resulta menor que para os modelos tridimensionais que ao longo do domínio se mantem igual à altura do morro.

A Figura 4.3 mostra os resultados de campo de velocidades dos quatro casos estudados para o morro C. O fenômeno que aconteceu nos morros A e B se repete de novo, pois tanto para o perfil liso a aceleração no topo do morro é maior que no rugoso como para os casos bidimensionais essa aceleração do escoamento é maior que nos casos tridimensionais. Percebe-se também que ao aumentar a inclinação dos morros a esteira aumenta tanto em altura como em comprimento em comparação aos morros com menor declive.

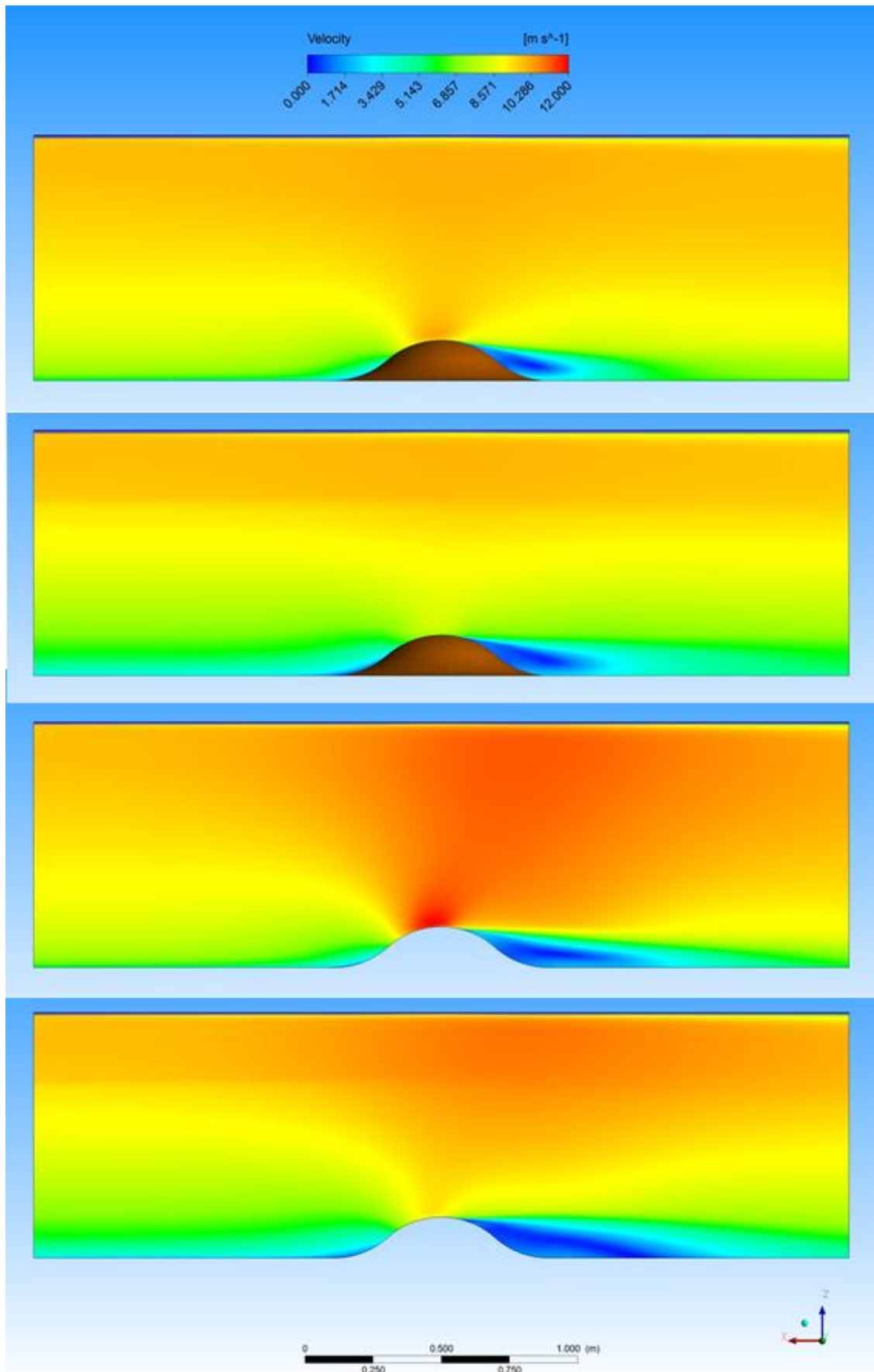


Figura 4.1 – Campo de velocidades morro A.

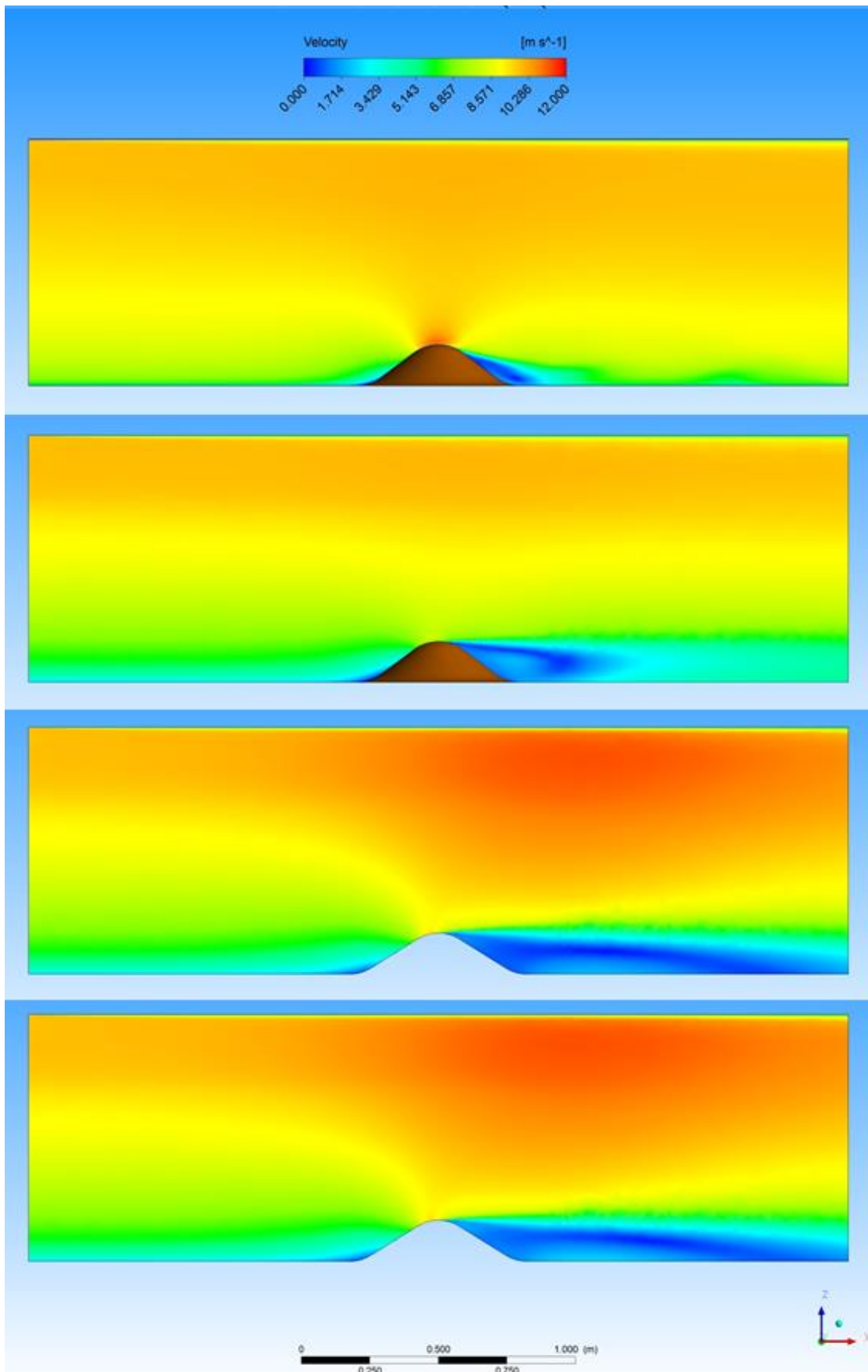


Figura 4.2 – Campo de velocidades, morro B.

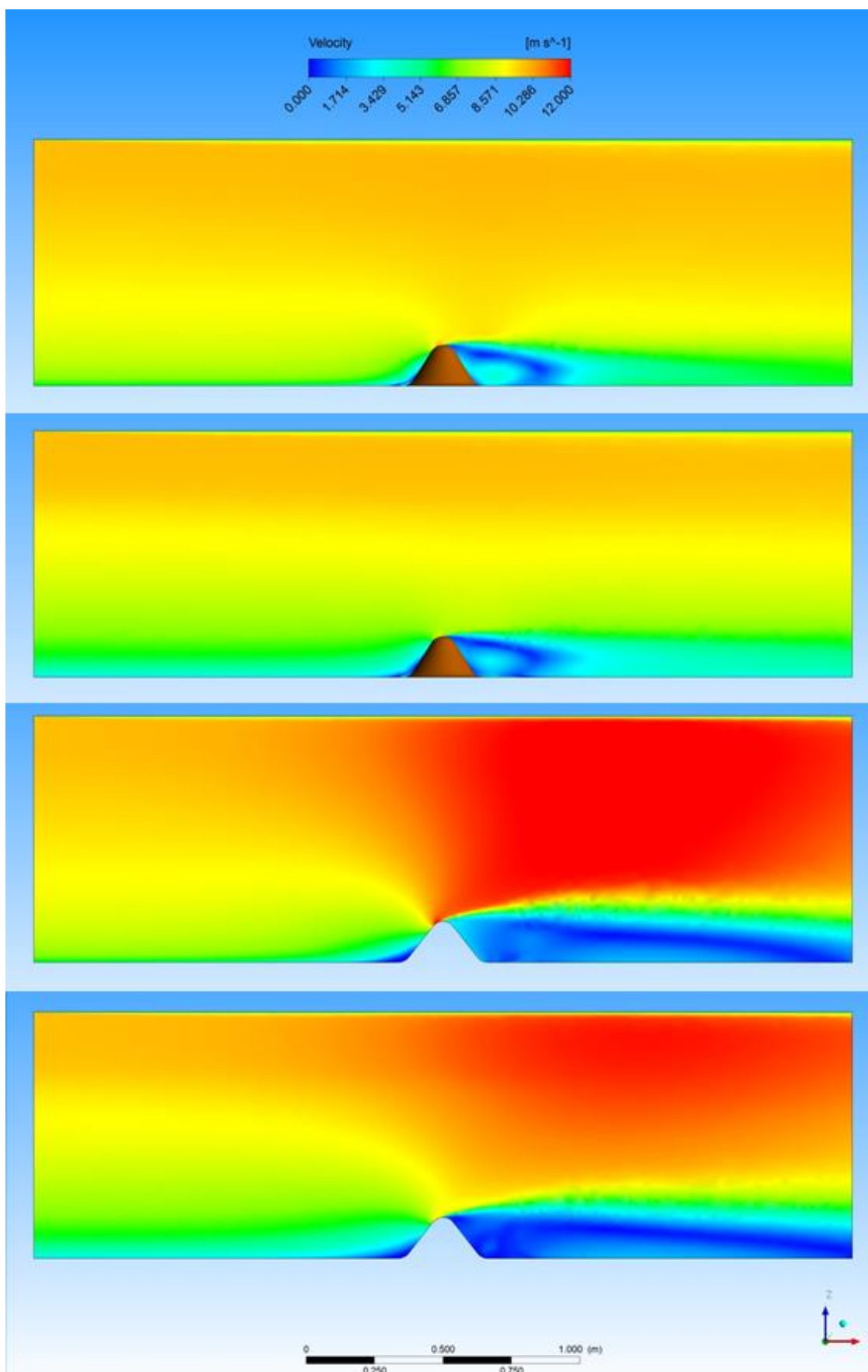


Figura 4.3 – Campo de velocidades, morro C.

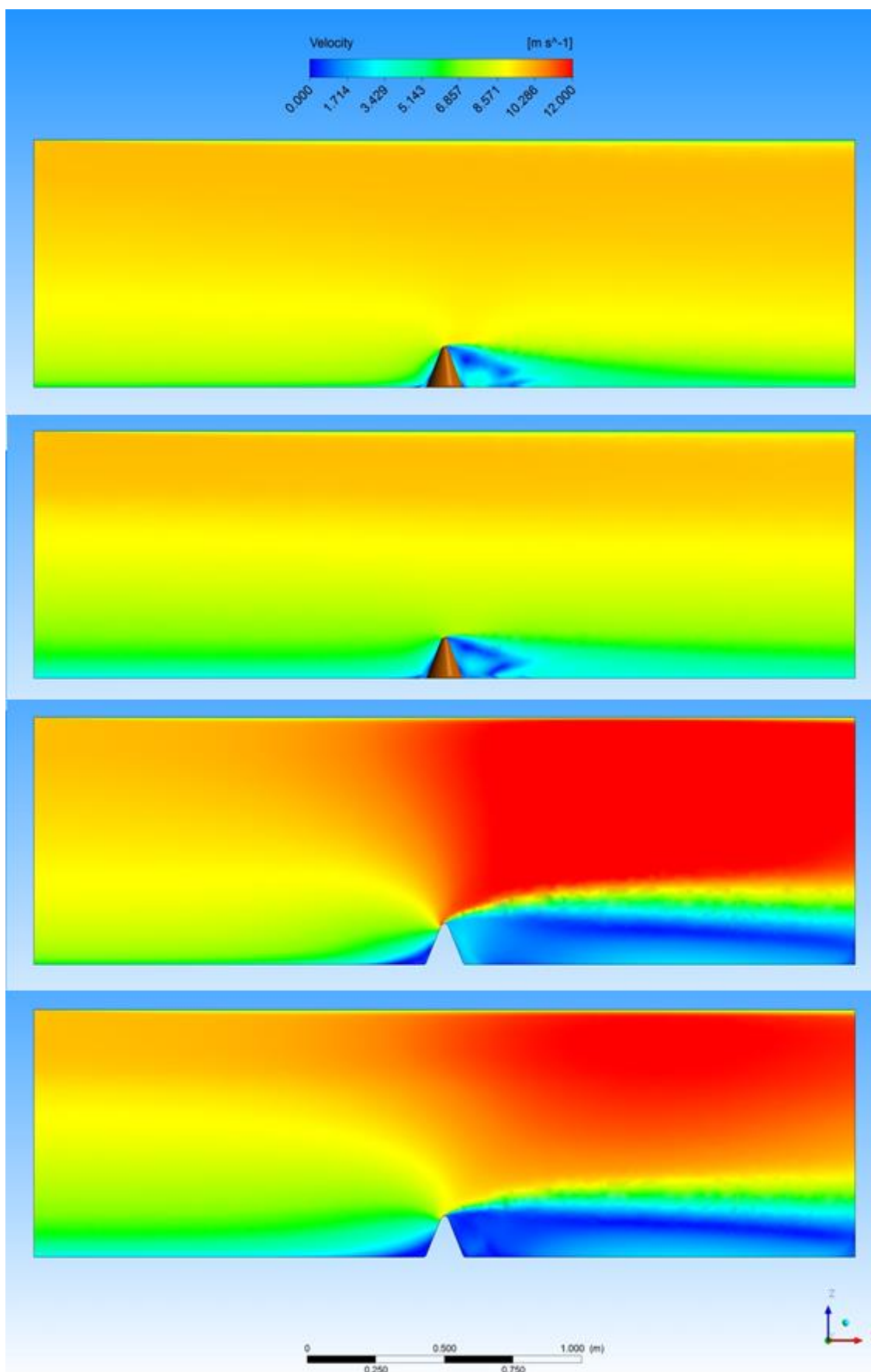


Figura 4.4 – Campo de velocidades, morro D.

A Figura 4.4 apresenta os quatro casos estudados do morro D de inclinação 64° . Os casos que representa um terreno liso apresentam maior aceleração do escoamento que o terreno rugoso e os casos em 2D apresentam maior aceleração no escoamento na região superior ao morro que nos casos em 3D. O comprimento da esteira no caso tridimensional é a menor dos quatro modelos estudados, porém a esteira no caso bidimensional é a maior tanto em altura como em comprimento dos quatro modelos de morro analisados, percebe-se que o domínio computacional é menor que a esteira que gera o morro D 2D.

Depois de analisar todas as imagens se pode confirmar que em todos os modelos de morro o perfil com expoente $p = 0,11$, que representa um terreno liso, o escoamento na região do topo do morro acelera mais que com o perfil $p = 0,23$, que representa o terreno rugoso. Ao mesmo tempo se pode afirmar que em todos os modelos bidimensionais o escoamento na região superior ao topo do morro sofre uma maior aceleração que nos modelos tridimensionais. A esteira a jusante do morro para os modelos de menor inclinação e 3D apresentam um maior comprimento, isso é devido a que o morro tem uma área maior. Referente à esteira dos modelos bidimensionais, percebe-se que ao aumentar a inclinação a esteira aumenta tanto em altura como em comprimento.

4.2 CAMPO DE ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA

Nesta seção são apresentadas as imagens dos campos de energia cinética turbulenta no plano médio longitudinal do domínio. Novamente, para todos os casos, a superfície do lado esquerdo representa a entrada do domínio. O topo dos morros é a região que mais interessa, uma vez que as flutuações de velocidade mais fortes ocorrem nesta região e é onde a esteira gerada pela topografia se inicia. Como foi introduzido no Capítulo 3.2.4, a intensidade de turbulência é função da energia cinética turbulenta k e da velocidade média v .

Similarmente a seção anterior, as figuras estão ordenadas da seguinte forma: primeiramente, o morro A é apresentado em sua versão 3D para ambos perfis de velocidade: $p = 0,11$ e $p = 0,23$, seguidos de sua versão 2D, novamente para os dois perfis de velocidade. Os morros B, C e D são então apresentados, seguindo a mesma ordem descrita para o morro A.

A Figura 4.5 apresenta o campo de energia cinética turbulenta do morro A. No caso 3D o perfil liso apresenta menor energia que o apresentado posteriormente com o perfil rugoso, isso é devido a que o terreno rugoso tem uma intensidade de turbulência inicial de 15% e, portanto gera uma maior flutuação de velocidades que no terreno liso que tem um perfil de intensidade de 5%. Para os quatro casos a região com maior energia cinética turbulenta é a região a jusante do morro onde tem maior flutuação de velocidades devido a esteira gerada pelo morro.

A Figura 4.6 mostra o campo de energia cinética turbulenta do modelo de morro B com inclinação de 32° . A região com maior energia cinética turbulenta é a jusante do morro para os quatro casos estudados. O modelo bidimensional apresenta uma maior energia como já se previu com as imagens do campo de velocidades, pois essa região é dominada pelo fenômeno de recirculação devido ao gradiente de pressão adverso, devido a essa flutuação na velocidade a turbulência é maior. Ao igual que aconteceu no morro A, os casos com perfil $p = 0,23$ possuem uma intensidade de turbulência inicial de 15% por esse motivo todo o domínio apresenta uma maior energia cinética turbulenta que nos casos com perfil $p = 0,11$ que inicialmente possuem uma intensidade de turbulência de 5%.

A Figura 4.7 apresenta os resultados do campo de energia cinética turbulenta para os quatro casos de estudo do morro C. No caso tridimensional se pode visualizar que para o perfil de velocidade de entrada que corresponde a um terreno rugoso a energia turbulenta é maior no domínio todo em comparação ao terreno liso, porém o valor máximo em ambos os casos é idêntico e acontece na mesma região. No modelo bidimensional devido à grande recirculação a jusante do morro para ambos os perfis de velocidade, a energia cinética turbulenta é maior nessa região. Ao igual que nos morros A e B bidimensionais, o terreno rugoso apresenta uns valores de turbulência maiores que no terreno liso.

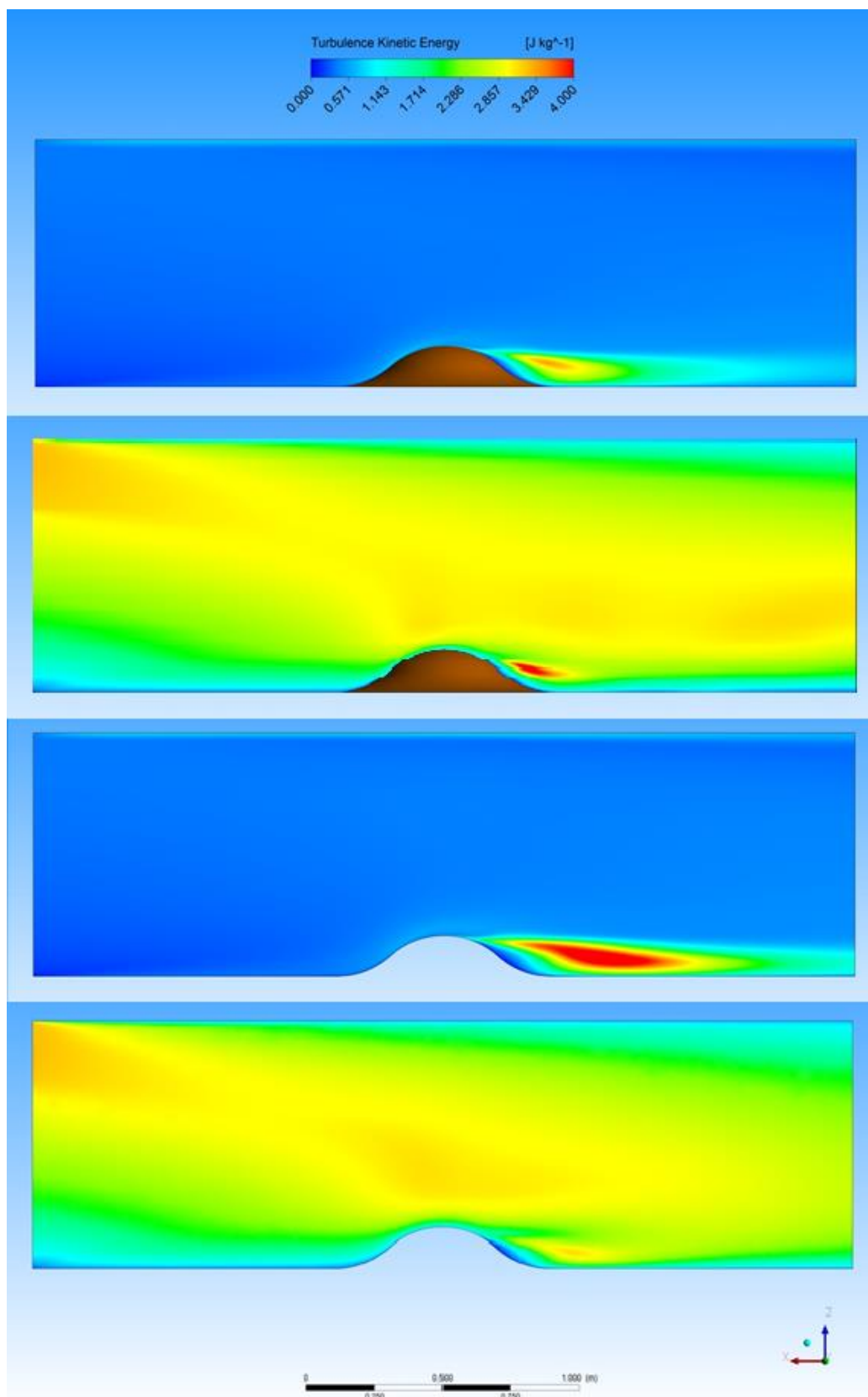


Figura 4.5 – Campo de energia cinética turbulenta, morro A.

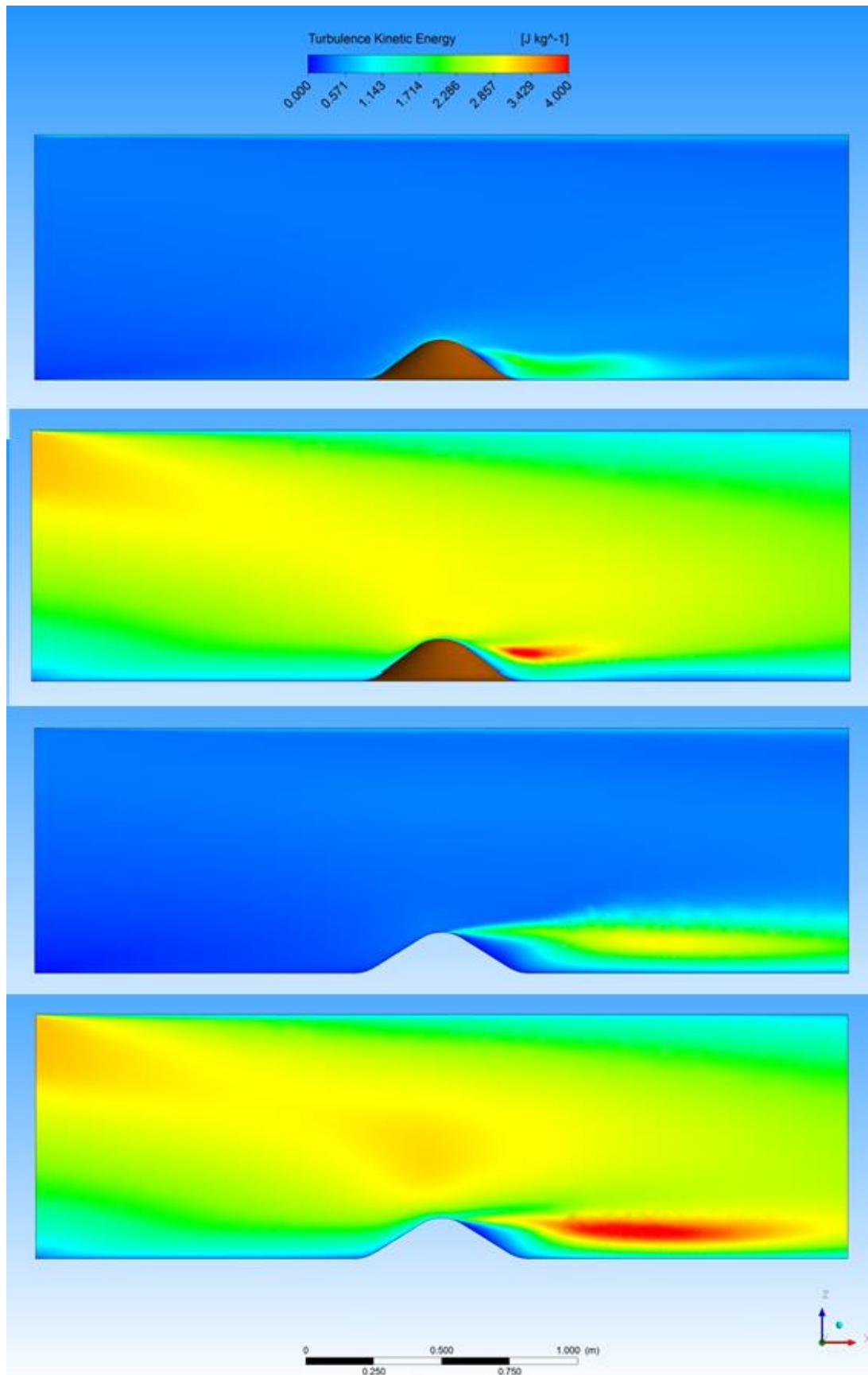


Figura 4.6 - Campo de energia cinética turbulenta, morro B.

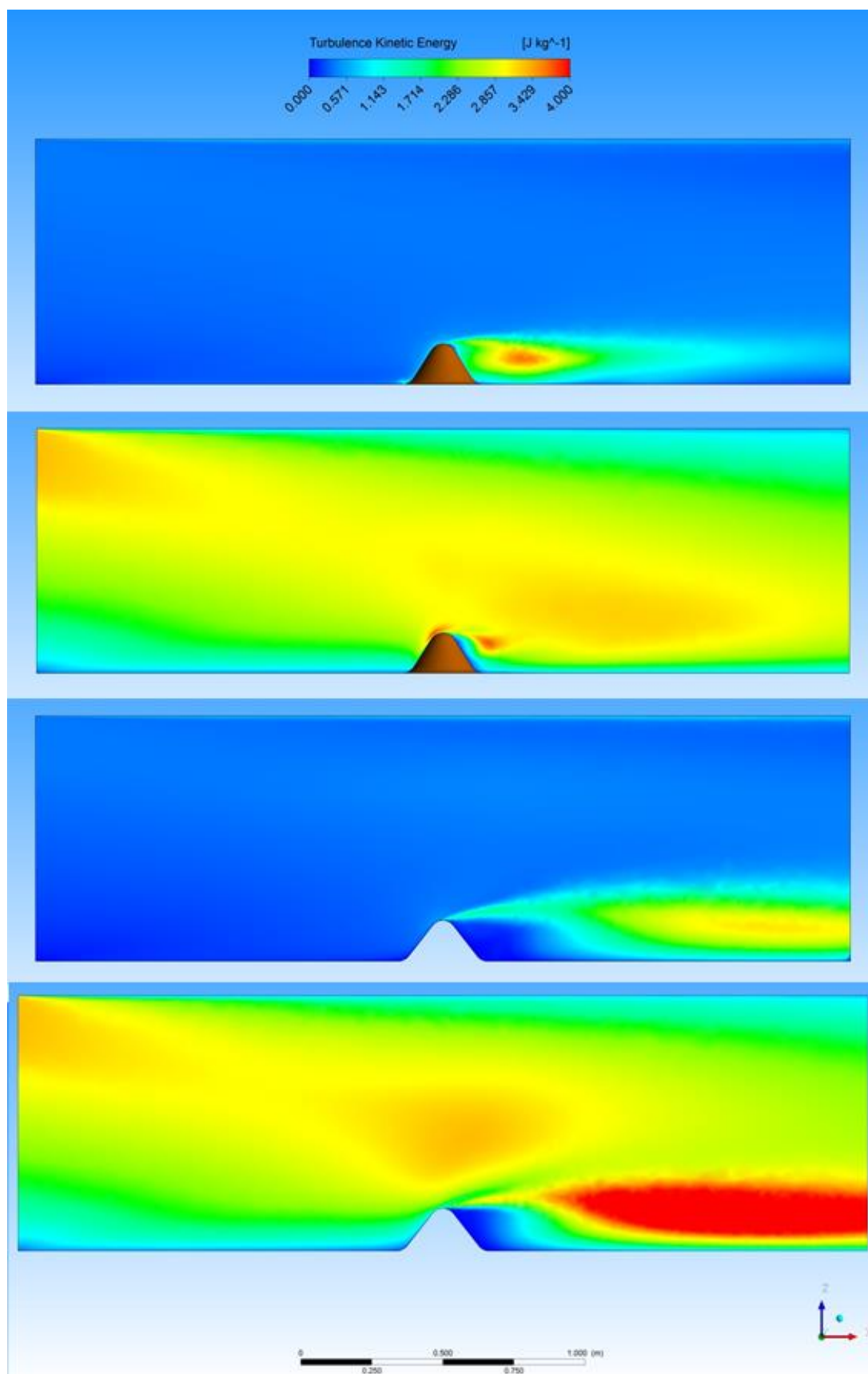


Figura 4.7 - Campo de energia cinética turbulenta, morro C.

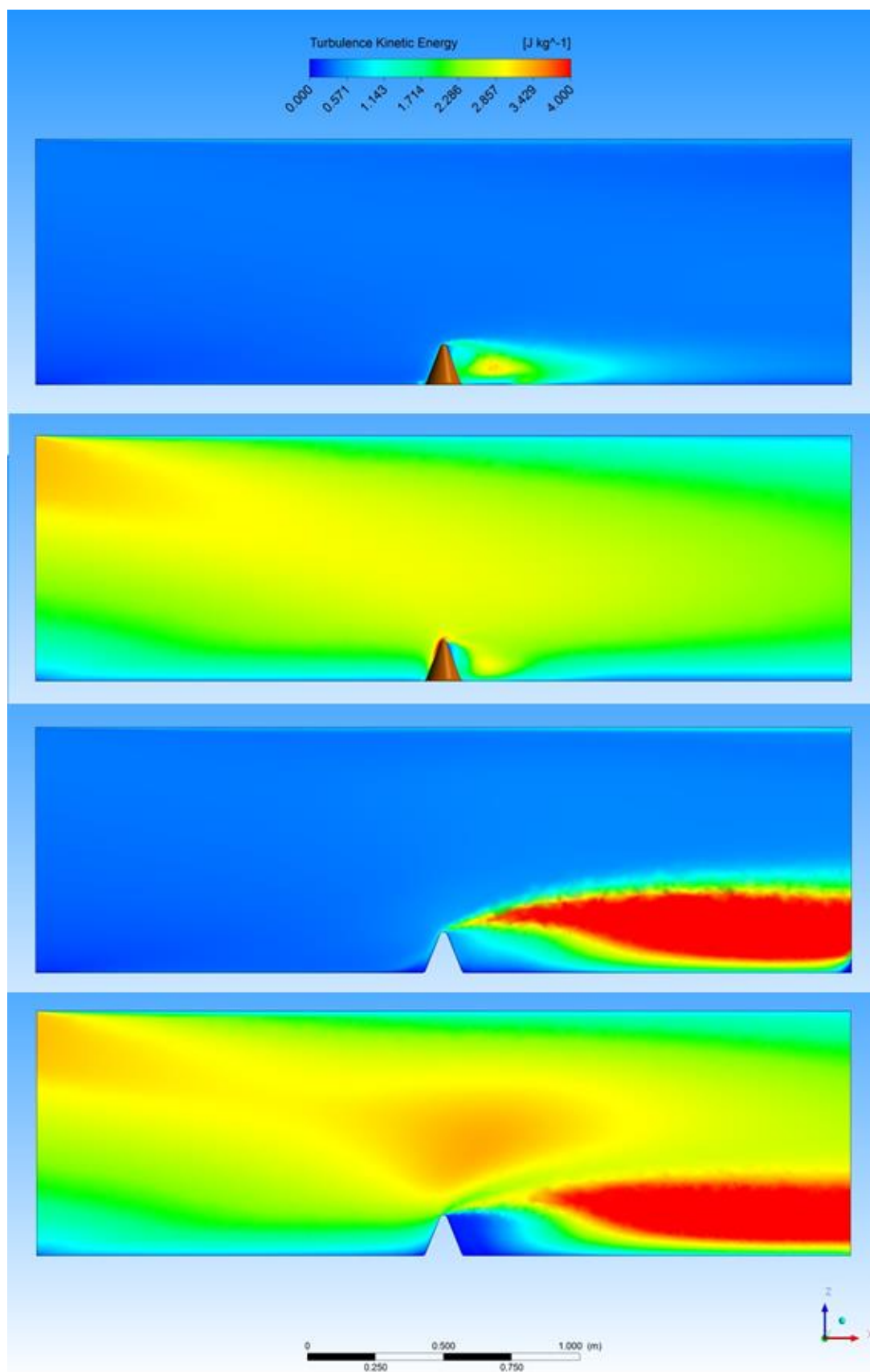


Figura 4.8 - Campo de energia cinética turbulenta, morro D.

A figura 4.8 representa as imagens do contorno de energia cinética turbulenta do morro D, o de maior declive. Visualizando as imagens consegue se perceber que no caso que representa o perfil de terreno rugoso a energia cinética turbulenta é maior em todo o domínio, isso é devido à condição de entrada de 15% de intensidade de turbulência. A jusante do morro no modelo tridimensional percebe-se que o valor máximo em ambos os perfis é idêntico. Para o modelo tridimensional acontece similar ao caso bidimensional, a região com maior flutuação de velocidade apresenta também maior energia cinética turbulenta, para ambos os perfis os resultados máximos acontecem na mesma região e com a mesma intensidade.

Uma vez analisadas todas as imagens do campo de energia cinética de turbulência se pode afirmar que em todos os modelos de morro que representam um terreno liso o escoamento tem menor energia que com os que representam o terreno rugoso, isso é devido à condição inicial do perfil de intensidade de turbulência. Também se pode afirmar que em todos os modelos bidimensionais o escoamento na região a jusante do morro sofre uma maior flutuação da velocidade que nos modelos tridimensionais. A energia cinética turbulenta a jusante do morro para os modelos de menor inclinação e 3D apresentam um maior comprimento, isso é devido a que o morro tem uma área maior. Referente à energia cinética turbulenta dos modelos bidimensionais, percebe-se que ao aumentar a inclinação a energia aumenta.

4.3 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL - NUMÉRICO

Este capítulo do trabalho apresenta a comparação entre os dados experimentais obtidos em túnel de vento e os resultados obtidos mediante as simulações numéricas. Primeiramente, apresentam-se os resultados de velocidade no cume dos quatro morros para ambos os perfis de velocidade de entrada. Subsequentemente, são exibidos os perfis de intensidade de turbulência para os mesmos pontos que foram obtidos os resultados de velocidade.

4.3.1 PERFIL DE VELOCIDADES

Da Figura 4.9 até a Figura 4.16 são apresentados os perfis de velocidade e seus comportamentos como uma função da distância vertical z do centro dos morros $(x,y) = (0,0)$, medida em milímetros. A altura $z = 0$ corresponde ao ponto no topo dos

morros, onde a velocidade do escoamento é zero devido à condição de não deslizamento aplicada nas paredes do domínio. À medida que a altura z aumenta, a velocidade é também incrementada até alcançar a velocidade máxima, acontecendo desta forma o fenômeno de aceleração devido à presença do morro.

Os gráficos a seguir continuam com a mesma ordem que as seções anteriores. O morro A é apresentado em sua versão 3D para ambos perfis de velocidade: $p = 0,11$ e $p = 0,23$, seguido de sua versão 2D, novamente com ambos perfis de velocidade. Os morros B, C, e D são apresentados na sequência, seguindo a mesma ordem descrita para o morro A. Todos os casos trazem também seus respectivos dados experimentais para comparação.

Os resultados da Figura 4.9 representam os perfis de velocidade experimentais e numéricos, para a versão 3D do morro A. Os resultados para os dois valores de p apresentaram uma diferença média de 2,3% para $p = 0,11$ e 1,5% para o expoente $p = 0,23$. Especificamente na região próxima à superfície, onde nota-se o efeito da aceleração, os resultados numéricos, para $p = 0,11$, apresentaram valores de velocidade de 4 a 7% superiores aos registrados para o mesmo caso experimental. Para o caso com $p = 0,23$ os valores simulados próximos à superfície do morro apresentam um incremento de 2% mais do que os dados experimentais.

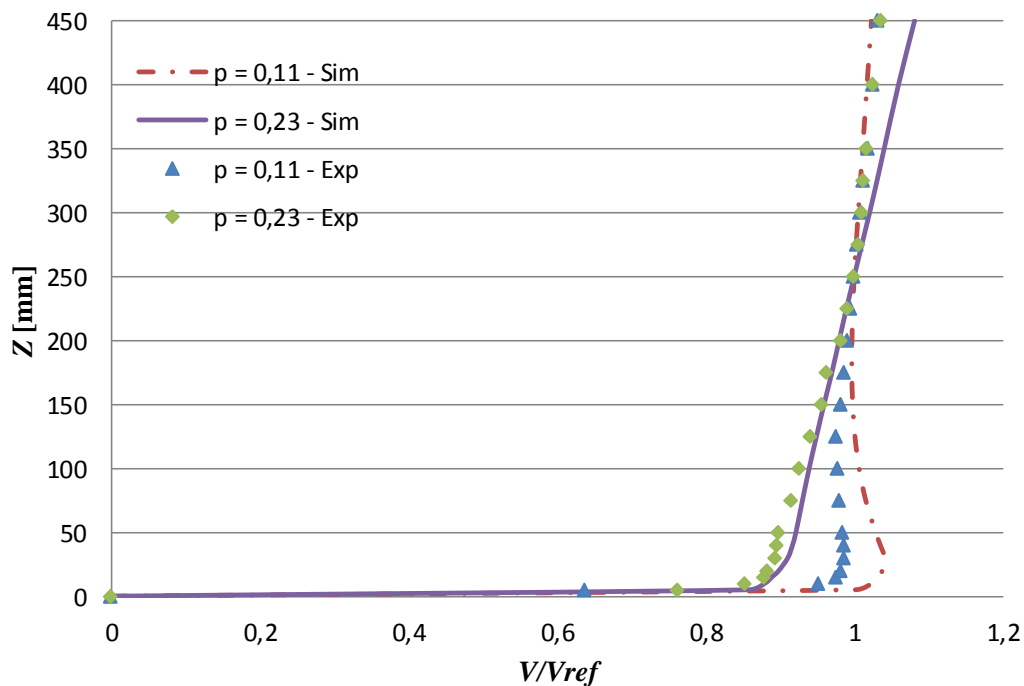


Figura 4.9 - Perfis de velocidade no cume do modelo A 3D experimentais e numéricos.

De modo similar, o gráfico da Figura 4.10 apresenta uma diferença média de 3,2% utilizando o expoente $p = 0,11$ e de 2,3% para $p = 0,23$. Na região próxima à superfície, os resultados da simulação, para $p = 0,11$, apresentaram valores de velocidade de 2 a 6% maiores aos registrados para o mesmo caso experimental. Para o caso $p = 0,23$ os valores simulados próximos à superfície do morro apresentam um incremento de 2% mais do que os dados experimentais, similar ao caso 3D.

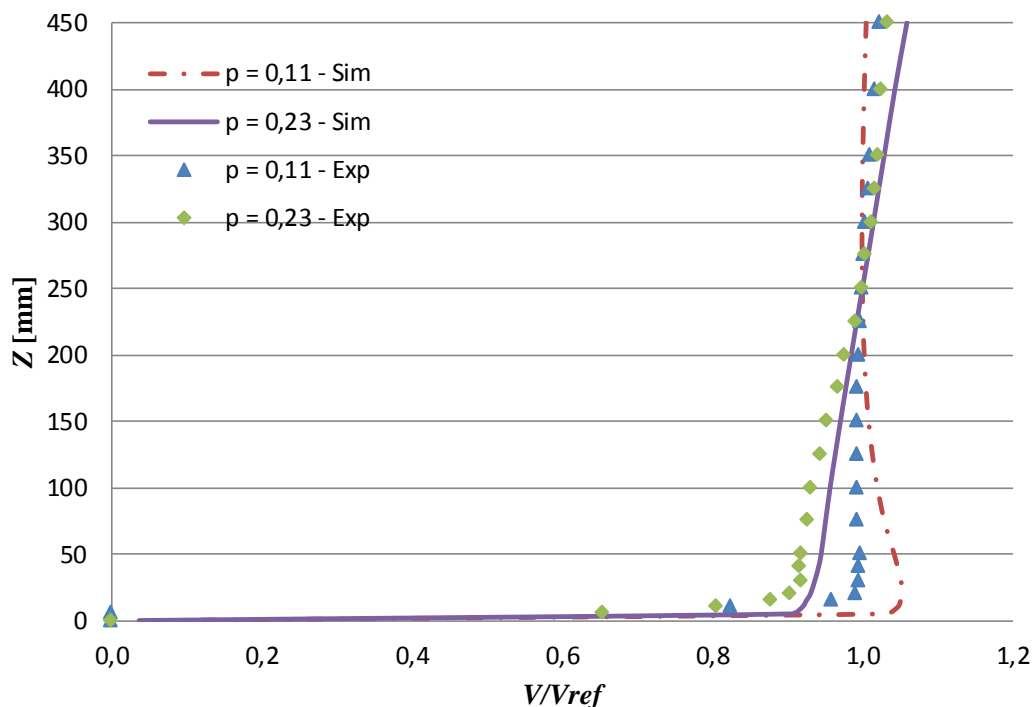


Figura 4.10 - Perfis de velocidade no cume do modelo A 2D experimental e numérico.

Na Figura 4.11 apresentam-se os resultados do morro B 3D para os dois valores de p , os resultados apresentaram uma diferença média de 1,7% para $p = 0,11$ e uma diferença nula para o expoente $p = 0,23$. No caso $p = 0,11$ o formato do perfil de velocidade é similar ao experimental, pois os perfis estão superpostos até a distancia de 250 mm. Para o perfil $p = 0,11$ o perfil de velocidade simulado na região de 0 a 100 mm apresenta uma velocidade maior entre 2% a 5% comparado com o experimental.

De modo similar, o gráfico da Figura 4.12 apresenta uma diferença praticamente nula entre os casos simulados e os dados experimentais e o formato do perfil também tem um formato similar em ambos os casos, pois os perfis estão superpostos um acima do outro demonstrando a coincidência entre os resultados. A diferença média entre os dados experimentais e os resultados numéricos é inferior a 1%.

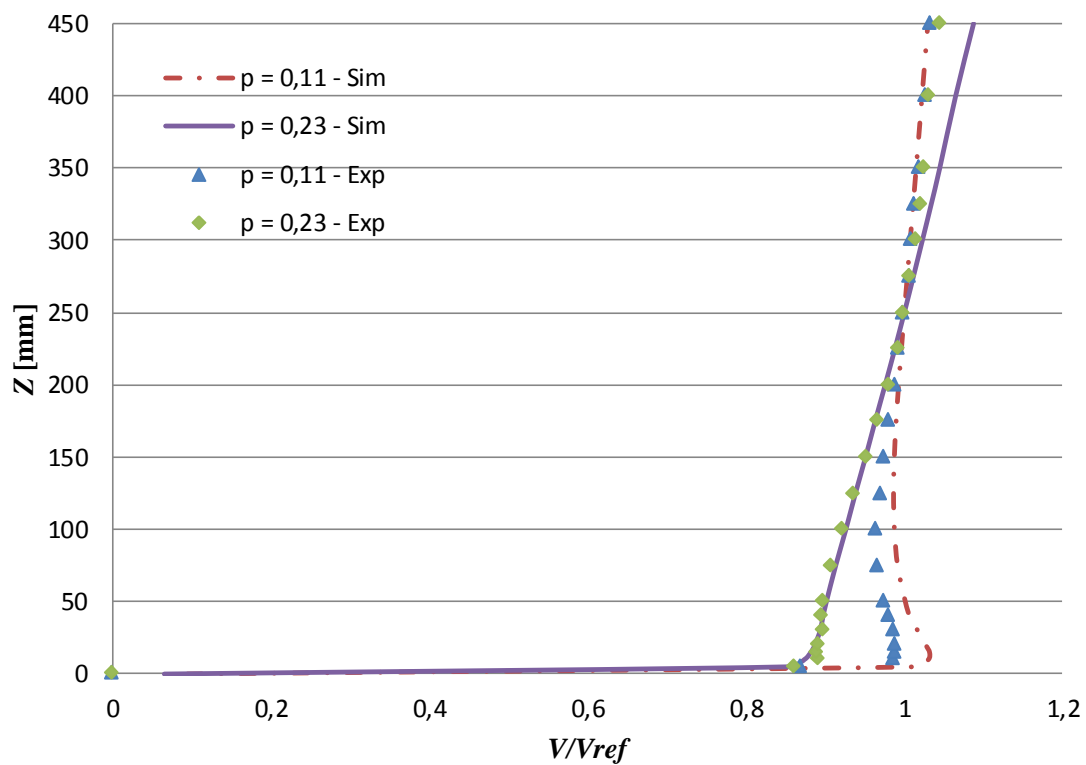


Figura 4.11 - Perfis de velocidade no cume do modelo B 3D experimental e numérico.

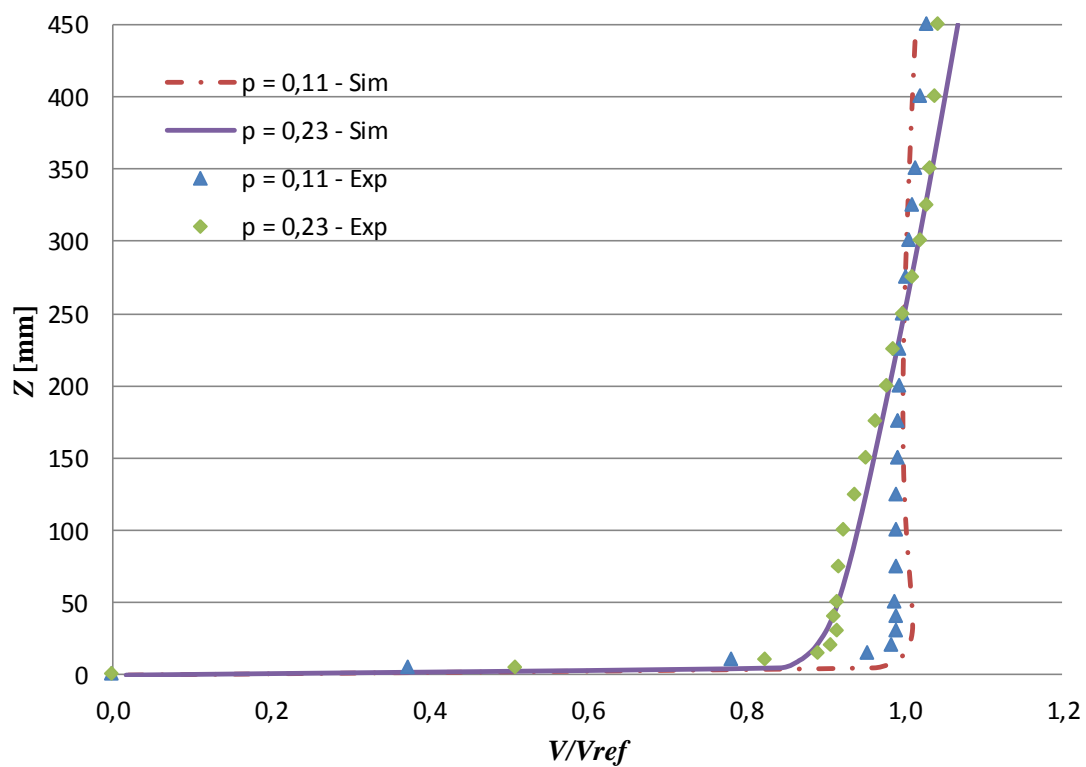


Figura 4.12 - Perfis de velocidade no cume do modelo B 2D experimental e numérico.

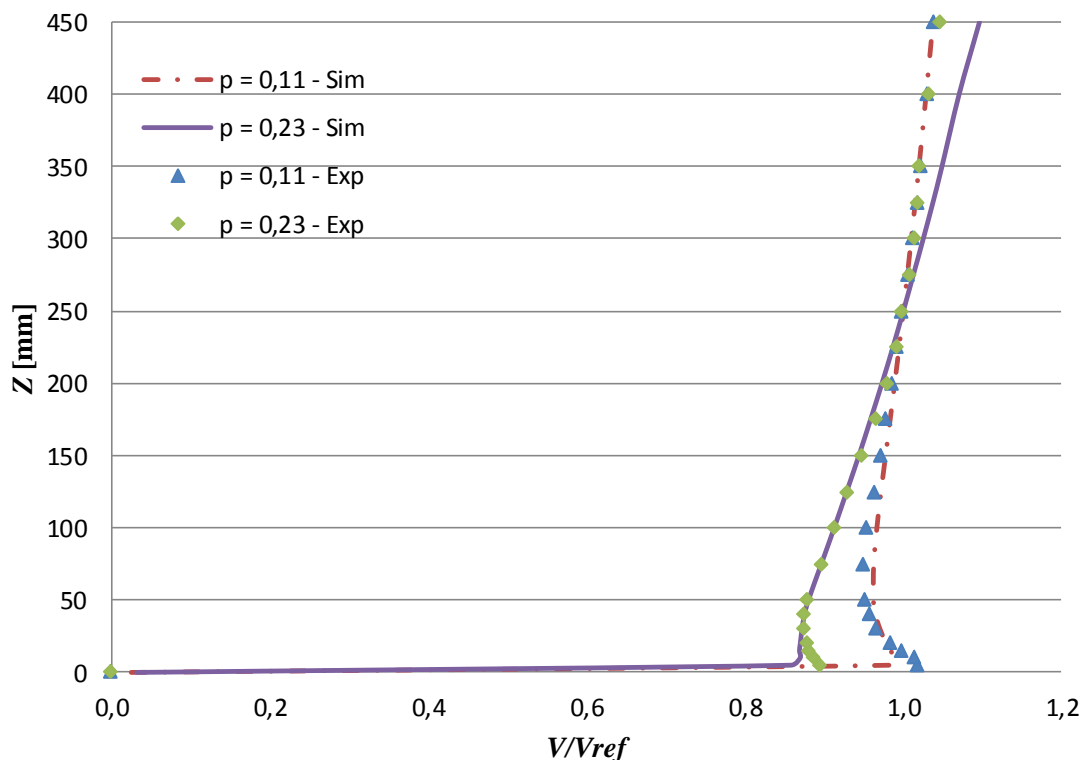


Figura 4.13 - Perfis de velocidade no cume do modelo C 3D experimental e numérico.

Na Figura 4.13 apresentam-se os resultados do morro C 3D para os dois valores de p . Os resultados apresentaram uma diferença média praticamente nula. Pode-se visualizar que o formato do perfil de velocidades para ambos os perfis comparado com os experimentais são parecidos, unicamente nos casos simulados apresentam um pico de aceleração de um 3% maior em ambos os casos comparados com os dados experimentais.

Os resultados da Figura 4.14 representam os perfis de velocidade experimentais e numéricos, para a versão 2D do morro C. Os resultados para os dois valores de p apresentaram uma diferença média de 1,9% para $p = 0,11$ e 1% para o expoente $p = 0,23$. Na região 0 a 50 mm, os resultados da simulação, para $p = 0,11$, apresentaram valores de velocidade de 3a 4% maiores aos registrados para o mesmo caso experimental. Para o caso $p = 0,23$ os valores simulados próximos à superfície do morro apresentam um incremento máximo de 4% mais do que os dados experimentais, similar ao caso 3D.

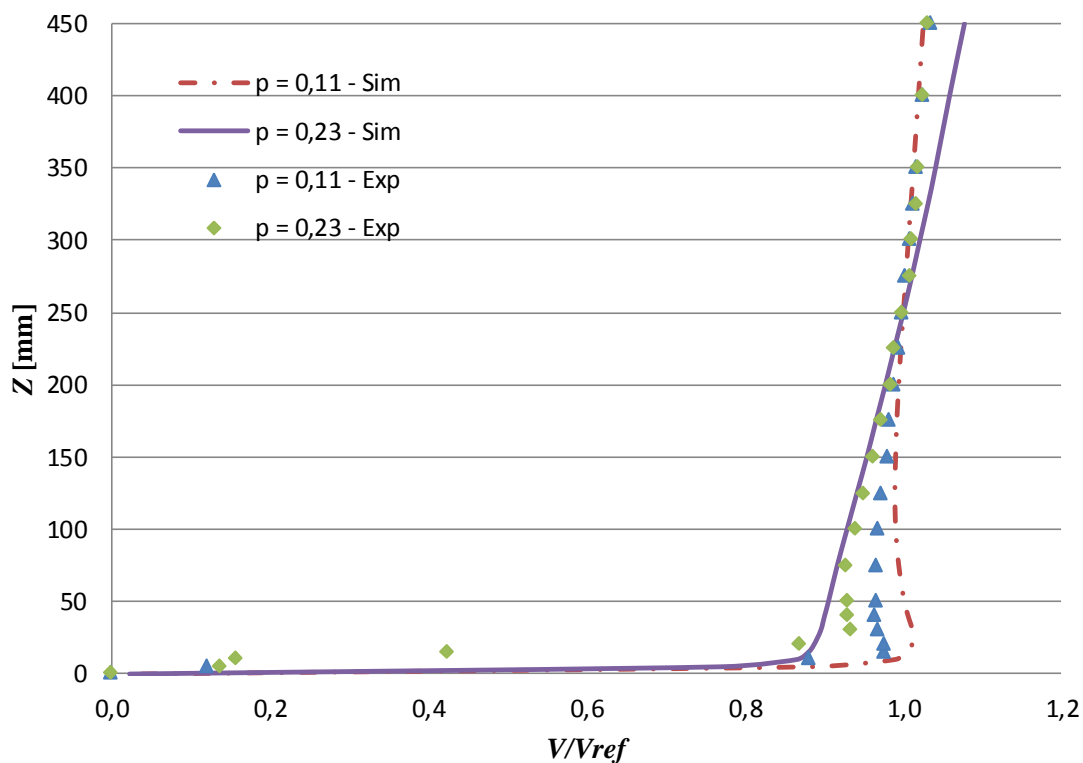


Figura 4.14 - Perfis de velocidade no cume do modelo C 2D experimental e numérico.

Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados do morro D 3D para os dois valores de p . Os resultados apresentaram uma diferença média praticamente nula. Pode-se visualizar que o formato do perfil de velocidades para ambos os perfis comparado com os experimentais são semelhantes. Unicamente nos casos simulados, apresenta-se um pico de aceleração de um 3% maior em ambos os casos comparados com os dados experimentais.

No caso 2D da Figura 4.16, a diferença entre os dados experimentais e resultados obtidos através das simulações é nula e o comportamento do perfil de velocidade no topo do morro é similar. Pode-se visualizar a concordância dos dados experimentais com os numéricos, pois tanto o formato do perfil de velocidade como o valor de velocidade nos pontos obtidos é coincidente.

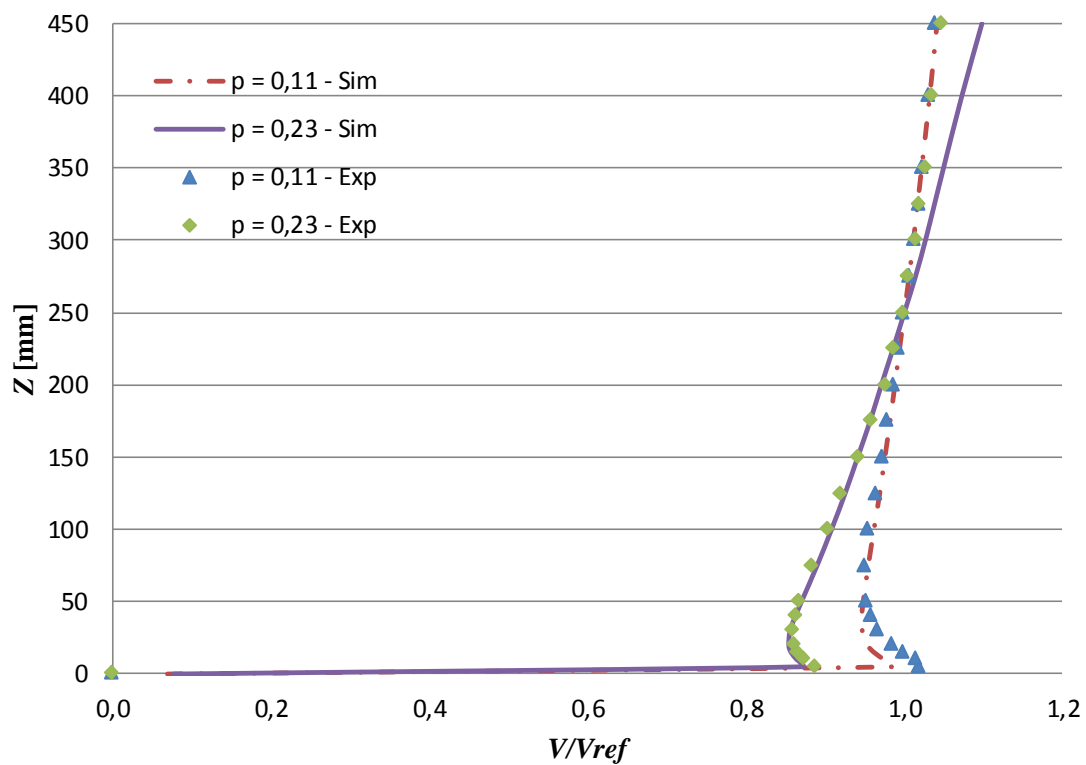


Figura 4.15 - Perfis de velocidade no cume do modelo D 3D experimental e numérico.

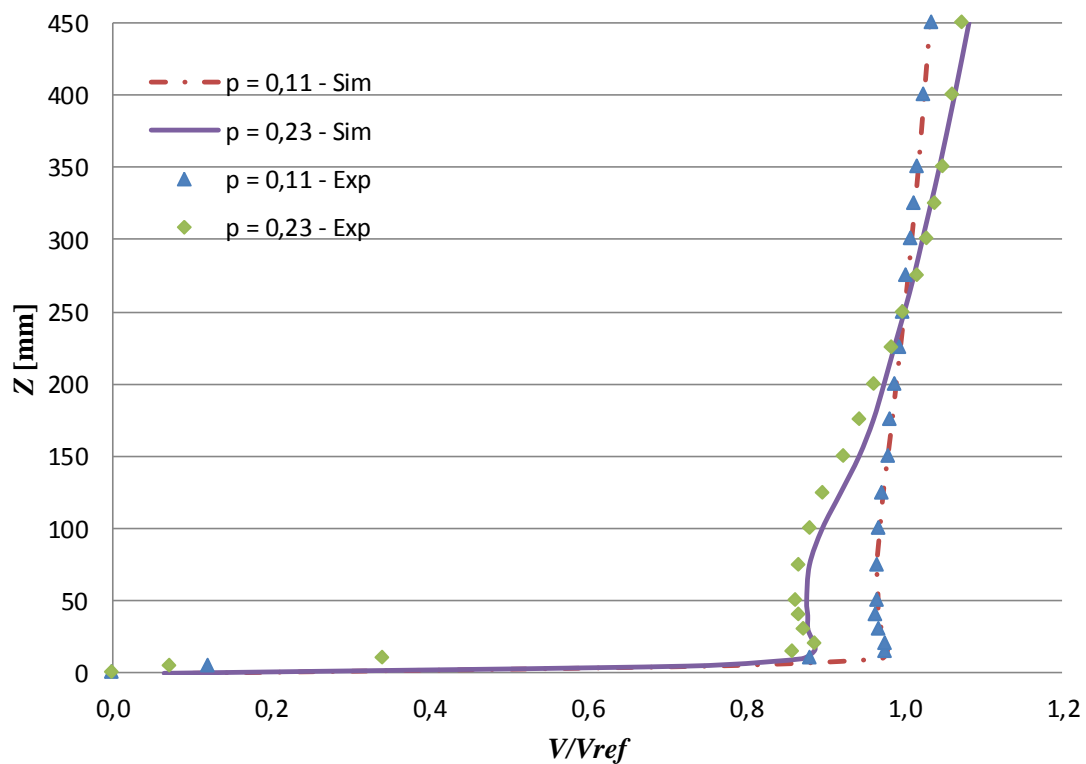


Figura 4.16 - Perfis de velocidade no cume do modelo D 2D experimental e numérico.

4.3.2 PERFIL DE INTENSIDADE DE TURBULENCIA

As Figuras 4.12 a Figura 4.19 mostram o perfil de intensidade de turbulência e sua variação como função da distância vertical z medida do cume dos morros $(x,y) = (0,0)$. É possível notar que, na altura compreendida entre 5 e 10 mm, a intensidade de turbulência atinge seus valores máximos para cada caso. Isto se deve ao problema que tem a anemometria de fio quente, pois na velocidade de trabalho (22 m/s) próximo à superfície esta metodologia de medição não é capaz de representar a velocidade. O fenômeno que acontece é o aquecimento da sonda e, por conseguinte o aquecimento da parede, assim provoca uma alta flutuação da velocidade que altera o resultado. À medida que a altura é incrementada, a magnitude da intensidade de turbulência diminui.

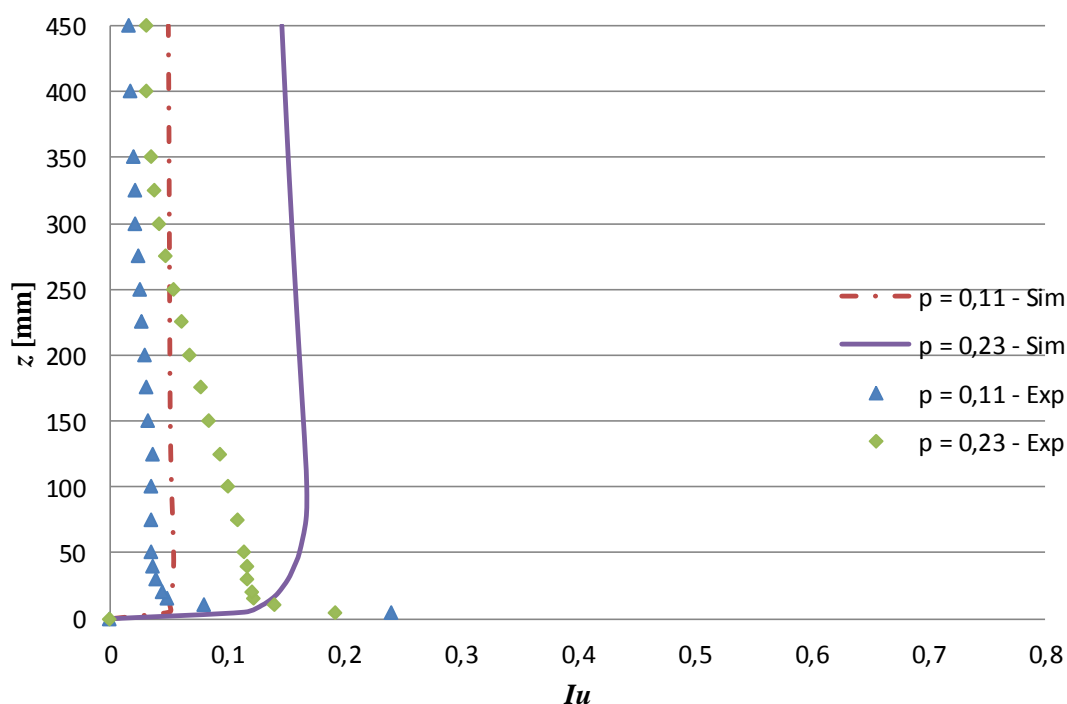


Figura 4.17 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo A 3D experimental e numérico.

A Figura 4.17 apresenta os resultados do morro A 3D, com o expoente da lei de potência $p = 0,11$ a maior diferença acontece na parte superior do perfil, no caso do expoente $p = 0,23$ a diferença vai aumentando desde 2% próximo à superfície até 10% no topo do perfil. O mesmo fenômeno acontece no modelo 2D representado na Figura 4.18.

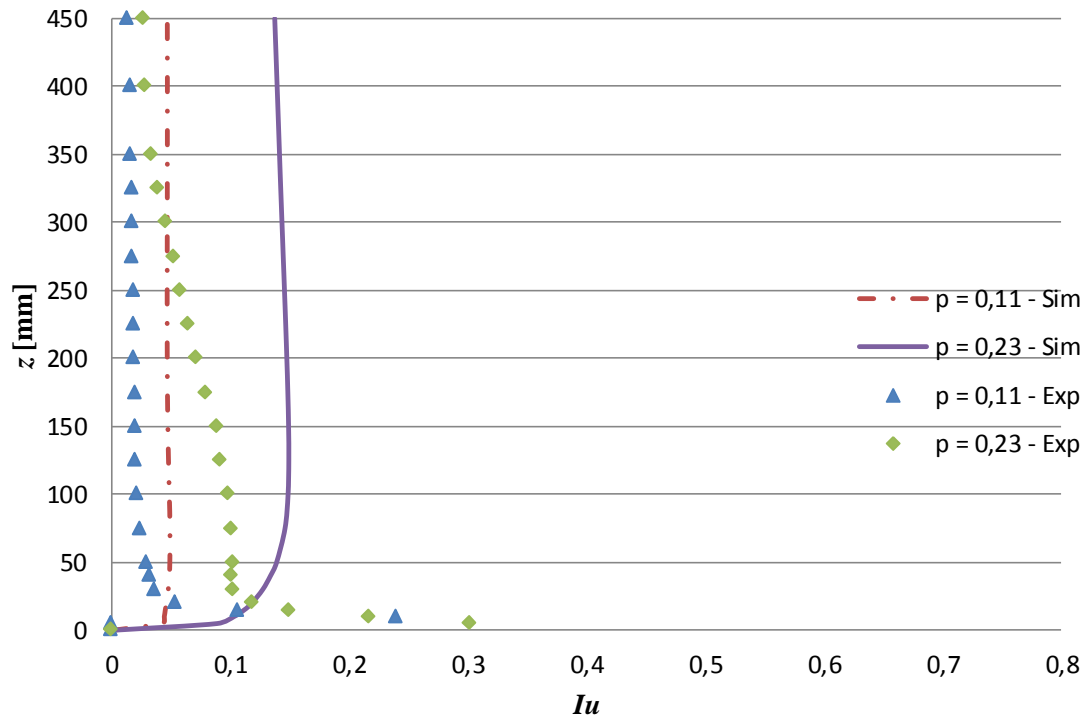


Figura 4.18 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo A 2D experimental e numérico.

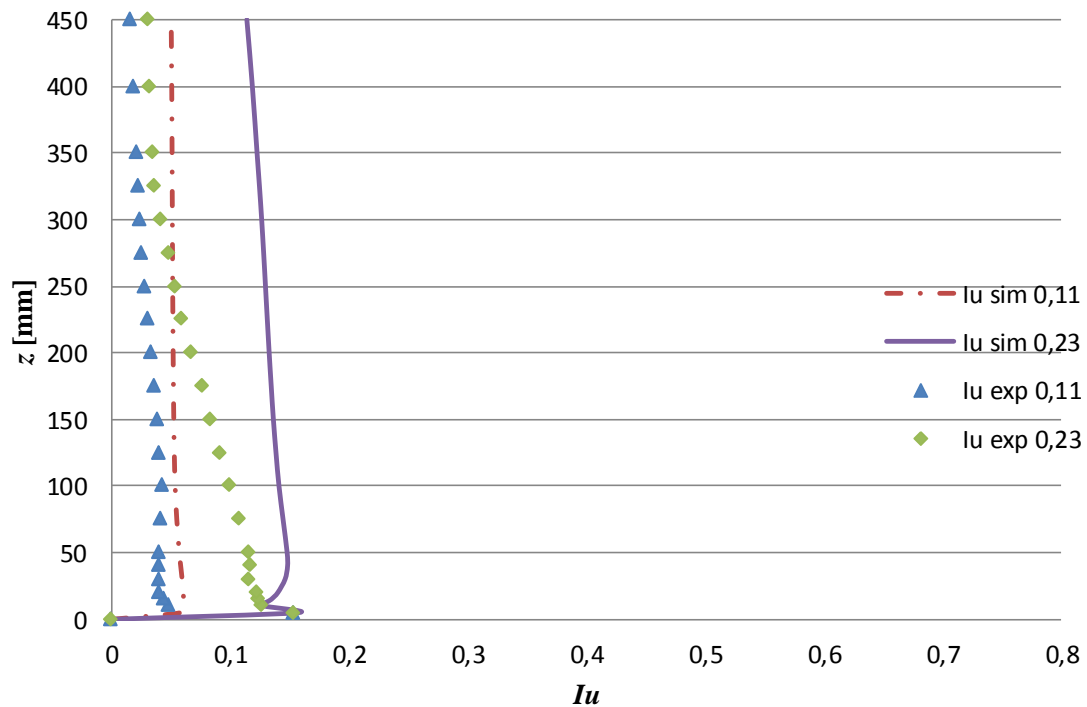


Figura 4.19 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo B 3D experimental e numérico.

Na Figura 4.19 percebe-se o mesmo fenômeno apresentado anteriormente em ambos os perfis.

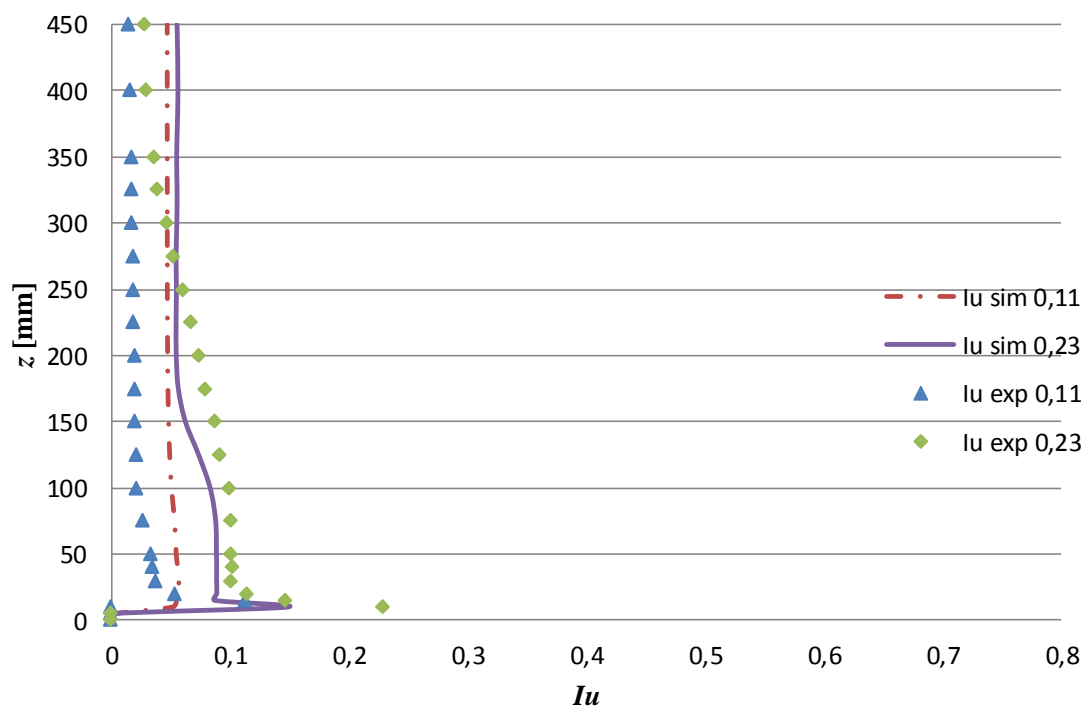


Figura 4.20 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo B 2D experimental e numérico.

O modelo B, 2D, representado na Figura 4.20 apresenta formatos de perfil de intensidade de turbulência parecidos. Em quanto aos valores, a diferença na região de 0 a 200 mm não supera o 3%, excluindo a região mais próxima à parede que como foi comentado anteriormente, os dados experimentais estão influenciados pela metodologia de obtenção de dados.

A Figura 4.21 apresenta os resultados do morro C, 3D, mostra um resultado similar aos casos anteriores em 3D. A diferença média é de 2% no caso do $p = 0,11$, mas no caso do $p = 0,23$ a diferença média é de um 10% devido à diferença do perfil de intensidade de turbulência inicial de 15% na entrada no domínio computacional.

A Figura 4.22 apresenta os resultados do morro C 2D, tanto para o expoente da lei de potencia $p = 0,11$ como $p = 0,23$ nos. Pode-se comprovar que a diferença máxima para ambos os perfis acontece no topo do perfil de intensidade de turbulência, essa diferença é de 4%. Na região inicial desde 10 mm até 300 mm a diferença não ultrapassa o 2%.

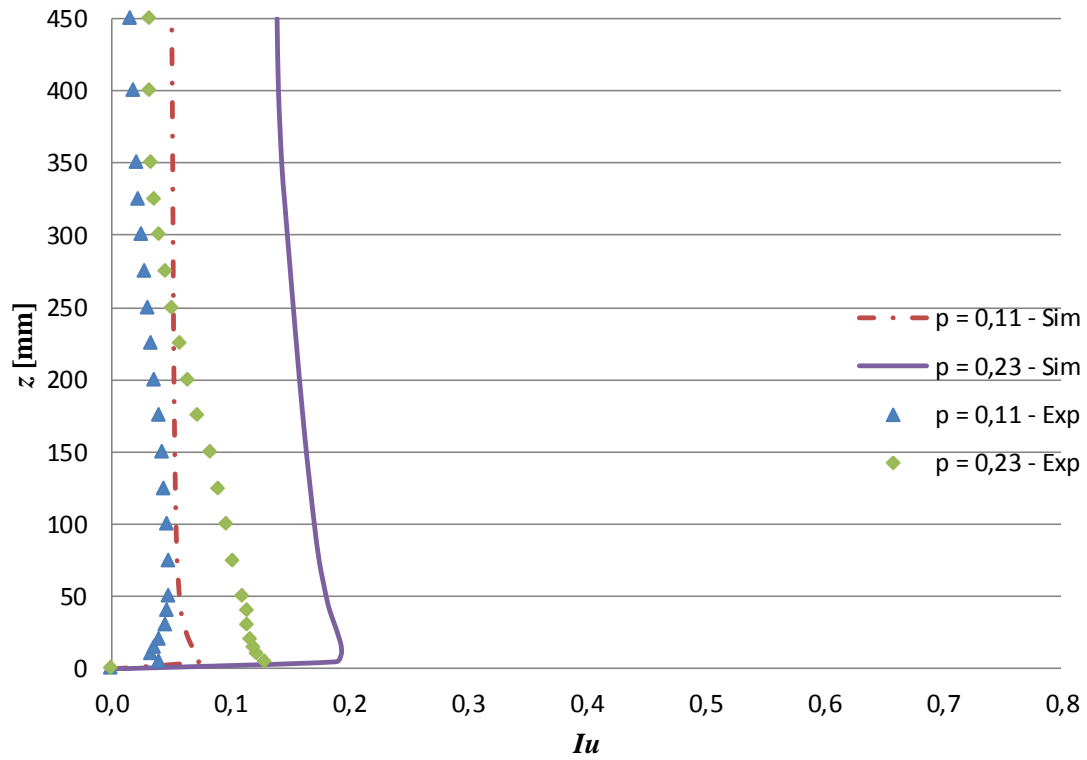


Figura 4.21 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo C 3D experimental e numérico.

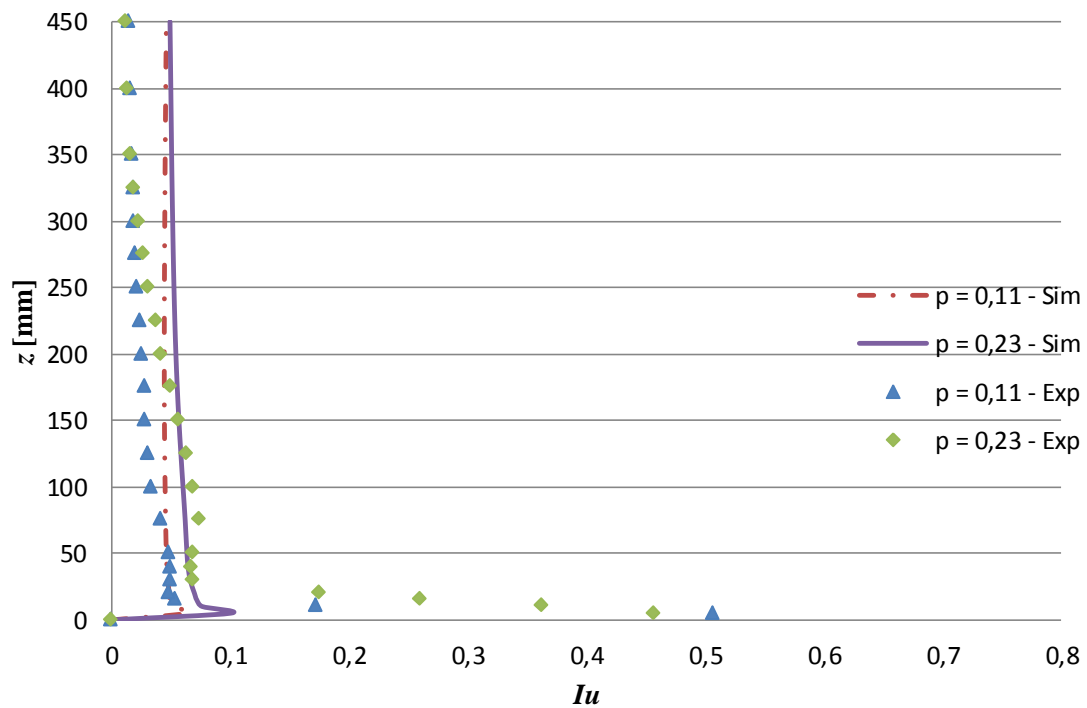


Figura 4.22 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo C 2D experimental e numérico.

Na Figura 4.23 percebe-se o mesmo fenômeno de maior flutuação da velocidade para a simulação com expoente $p = 0,23$, igual que nos anteriores morros em 3D. Assim pode-se concluir que nos modelos 3D a diferença entre os perfis de intensidade de turbulência é maior que nos modelos 2D que apresentam uma menor flutuação de velocidade e portanto uma menor intensidade de turbulência.

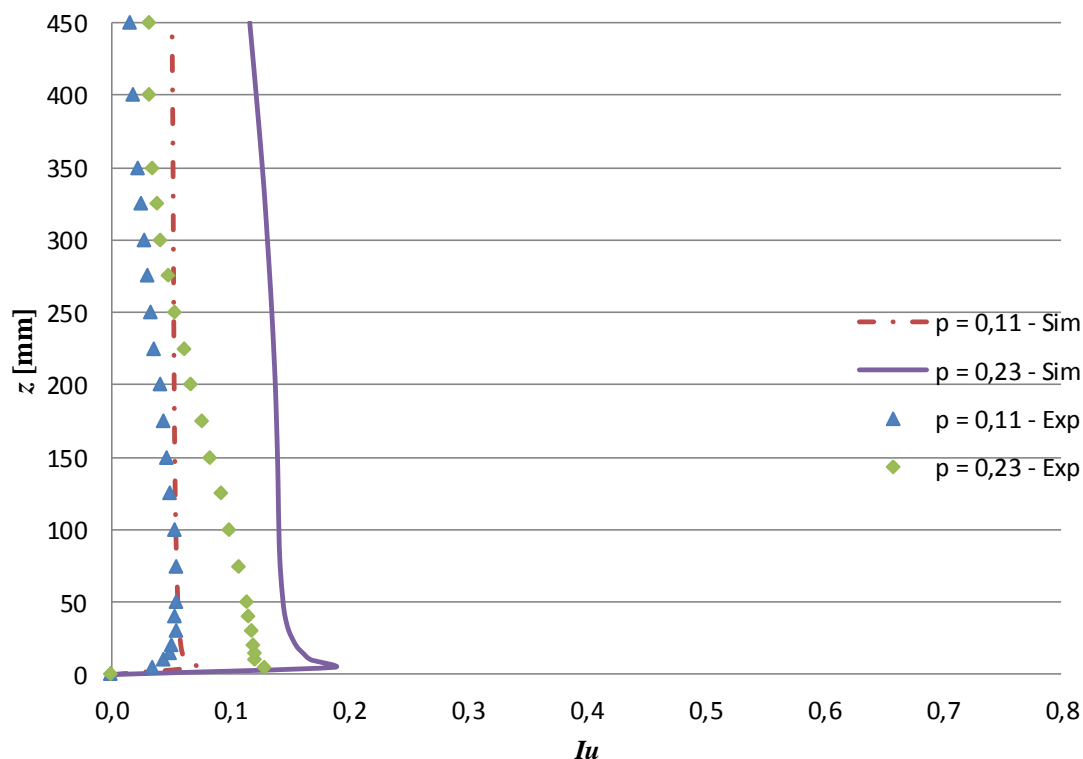


Figura 4.23 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo D 3D experimental e numérico.

Na Figura 4.24 é apresentado o último caso de estudo, modelo D, 2D. Este último gráfico demonstra que a concordância entre as simulações e os dados experimentais é maior para os casos em 2D e também para o perfil $p = 0,11$. Também pode-se concluir que quanto maior o declive do morro maior é a semelhança entre o formato dos perfis e maior é a concordância dos resultados, pois para este último modelo a diferença máxima apenas chega a 3%.

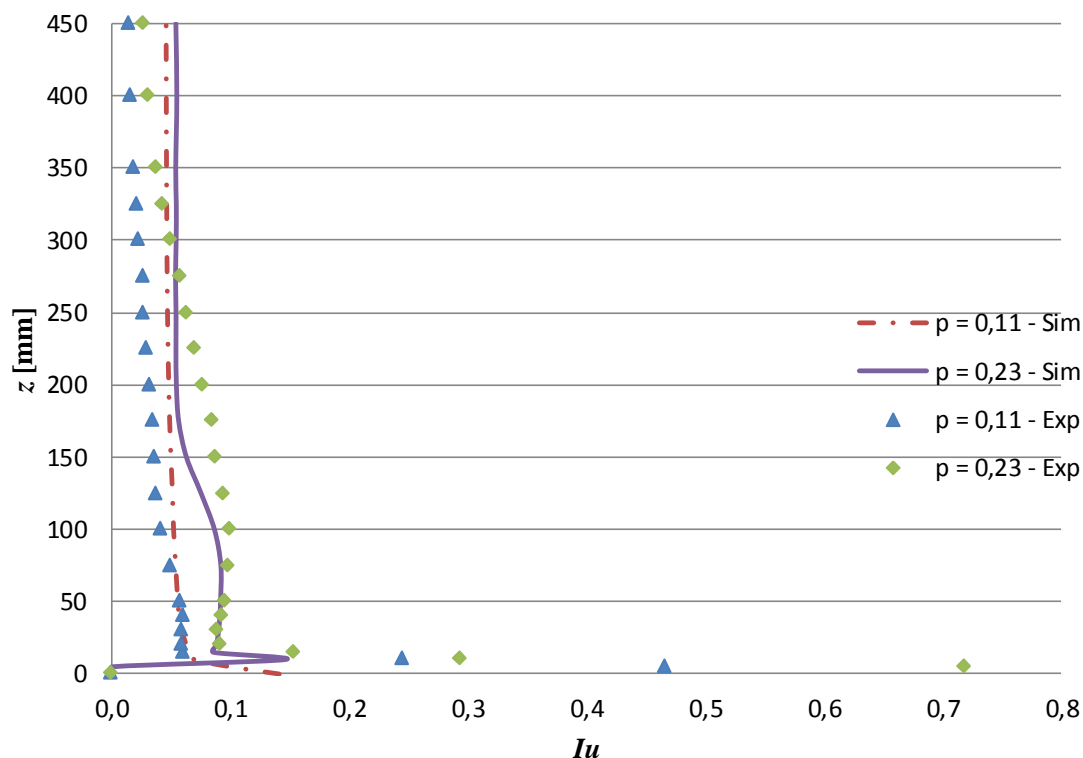


Figura 4.24 - Perfis de intensidade de turbulência no cume do modelo D 2D experimental e numérico.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre os fenômenos relacionados ao escoamento da CLA simulado em túnel de vento sobre uma topografia simples (morros com diferentes inclinações) através da dinâmica dos fluidos computacional. Características do escoamento do ar (velocidade, direção e intensidade de turbulência) causadas pela presença dos morros foram avaliadas por meio de um estudo numérico e seus resultados foram comparados com dados experimentais obtidos no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS.

O primeiro passo foi apresentar a metodologia numérica. Foi então validado em comparação a dados experimentais, inicialmente, os perfis de velocidade ao longo do eixo z no todo de cada um dos oito morros, sendo quatro deles tridimensionais e quatro deles bidimensionais, e na sequência, a intensidade de turbulência na mesma região, seguindo a mesma metodologia. Todos os morros têm a mesma altura, porém, com ângulos de inclinação diferentes ($\alpha = 25^\circ, 23^\circ, 52^\circ, 64^\circ$).

Um estudo de independência de malha foi realizado. As simulações feitas para esse propósito envolveram quatro malhas de cálculo com diferente densidade de volumes, para ambos os casos 2D e 3D, e apresentaram diferenças inferiores a 2% para a velocidade média obtida em uma altura de 200 mm acima do topo do morro. Isto leva a escolha do domínio comporto por aproximadamente 10 milhões de volumes, construído de modo que o valor de y^+ da parede é mantido entre os limites de 0 e 3 ($0 < y^+ < 3$), permitindo desta forma que o código consiga resolver as da subcamada viscosa e represente corretamente o campo de velocidades do escoamento próximo às paredes.

Depois de analisar todas as imagens dos campos de velocidades se pode afirmar que em todos os modelos de morro o perfil com expoente $p = 0,11$, que representa um terreno liso, o escoamento na região do topo do morro acelera mais que com o perfil $p = 0,23$, que representa o terreno rugoso. Juntamente se pode afirmar que em todos os modelos bidimensionais o escoamento na região superior ao topo do morro sofre uma maior aceleração que nos modelos tridimensionais. A esteira à jusante do morro para os modelos de menor inclinação e 3D apresentam um maior comprimento, isso é devido a que o morro tem uma área maior. Referente à esteira dos modelos bidimensionais, percebe-se que ao aumentar a inclinação a esteira aumenta tanto em altura como em comprimento.

Como conclusão das imagens apresentadas do campo de energia cinética de turbulência se pode afirmar que em todos os modelos de morro que representam um terreno liso o escoamento tem menor energia que com os que representam o terreno rugoso, isso é devido à condição inicial do perfil de intensidade de turbulência (15%). Também se pode afirmar que em todos os modelos bidimensionais o escoamento na região a jusante do morro sofre uma maior flutuação da velocidade que nos modelos tridimensionais. A energia cinética turbulenta dos modelos em 2D, se pode constatar que ao aumentar a inclinação a energia aumenta, igual que acontece com a velocidade.

Os resultados para os perfis de velocidade revelaram formatos similares entre o perfil obtido pelas simulações e do túnel de vento; a diferença máxima dos valores absolutos das simulações foi de 3% quando comparados aos valores experimentais. É importante mencionar que os resultados experimentais podem apresentar erros de até 5% devido às limitações dos instrumentos de medição. Desta forma, é possível afirmar que o perfil de velocidade está adequadamente validado se a margem dos erros devido à

instrumentação é levada em consideração. Também pode-se afirmar que os modelos de morro em 3D apresentam maior concordância nos resultados de velocidade que os modelos em 2D e que ademais quanto maior seja a inclinação do morro maior é a concordância com as medições experimentais, sendo o morro D 3D o que apresenta menor diferença nos resultados, posteriormente o morro D 2D e sequentemente o morro C 3D.

Os perfis de intensidade de turbulência, por sua vez, não alcançaram a mesma precisão. O perfil para $p = 0,11$ apresentou resultados numéricos até 8% menores entre o topo dos morros e a altura de aproximadamente 150 mm quando comparados aos dados do túnel de vento. Desta posição para cima, os perfis numérico e experimental não mostraram diferenças consideráveis. Os resultados numéricos para os perfis com $p = 0,23$ são de até 15% menores que os dados do túnel de vento nos primeiros 10 mm de altura sobre o morro, decaindo até 100 mm de altura, e aumentando novamente desta posição para cima, onde os resultados numéricos foram até 11% menores que os resultados obtidos no túnel de vento. Como se pode analisar nos gráficos, o modelo 2D apresenta uma diferença maior na região próxima à parede do morro, pois as medições experimentais captam um pico de intensidade de turbulência que varia entre 22% e 73%, mas como foi comentado isso é um erro da metodologia de obtenção dos dados experimentais, por esse motivo não foram comentados os resultados nessa faixa de 0 a 10 mm. No modelo 3D os resultados experimentais não apresentam este pico de intensidade de turbulência e, portanto os resultados numéricos são mais próximos. Também pode-se afirmar que os modelos de morro bidimensional apresentam maior concordância nos resultados de velocidade que os modelos tridimensionais e que ademais quanto maior é a inclinação do morro maior é a concordância com as medições experimentais, sendo o morro D 2D o que apresenta menor diferença nos resultados, posteriormente o morro C 2D e sequentemente o morro B 2D. É válido lembrar que o *software ANSYS Fluent* não permite ao usuário programar uma *User Defined Function* para os perfis de intensidade de turbulência na entrada do domínio, diferentemente dos perfis de velocidade do vento. Isto é apontado como o fator responsável pelas maiores diferenças obtidas na comparação dos perfis de intensidade de turbulência.

Este estudo se concentrou em avaliar como os perfis de velocidade de entrada e a intensidade de turbulência influenciam o escoamento sobre o topo dos morros.

Quando considerado o modelo 2D, os resultados numéricos e experimentais apresentaram um alto grau de concordância em formato e valores para os dois perfis de velocidade, para os quais a diferença máxima não foi maior que 4%. Os resultados para a intensidade de turbulência apresentaram diferenças menores que 6%. Para o modelo 3D, a concordância no formato e valor dos perfis de velocidade ainda é maior que nos casos bidimensionais e a diferença dos dados de velocidade é menor que 2,4%, entretanto, os valores numérico e experimental para a intensidade de turbulência com $p = 0,23$ podem diferir em até 9%. Este comportamento era esperado, uma vez que o perfil de intensidade de turbulência de entrada difere do experimental em 15%.

Esta concordância nos resultados permite concluir que a metodologia CFD utilizada no presente trabalho foi adequada para representar as características do escoamento de vento para os casos em estudo. É considerado que este estudo irá ajudar a consolidar o CFD como um meio confiável para avaliar as características do vento em terrenos complexos, contribuindo assim para a ciência do *micrositing*.

Para futuros trabalhos, propõe-se a busca de uma ferramenta CFD que permita modelar mediante uma UDF o perfil de intensidade de turbulência de entrada, desta forma conseguindo ainda uma maior concordância com os resultados de intensidade de turbulência. Também é sugerida a realização de estudos da Camada Limite Atmosférica real em regiões onde possam ser instaladas torres anemométricas em cumes de morros isolados ou taludes, visando realizar o estudo comparativo de dados reais com resultados obtidos mediante simulações numéricas.

Sobre o estudo referente ao modelo de turbulência utilizado no decorrer do trabalho é possível concluir que para estudos da CLA simulada em túnel de vento o modelo de turbulência $k-\omega$ SST em regime permanente e a realização de uma malha adequada para garantir o tratamento de parede, representam os resultados experimentais obtidos em túnel de vento no cume dos morros, mas futuros experimentos na região da esteira podem determinar o uso de outro modelo de turbulência mais preciso nesse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldabo, R. **Energia Eólica**. Editora ARTLIBER, 2002.
- ANSYS. **ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide**. ANSYS, Inc. Canonsburg, 2009.
- ANSYS; “**ANSYS Fluent Theory Guide**”, Release 15.5, ANSYS, Inc, November 2013a.
- ANSYS; “**ANSYS Fluent User’s Guide**”, Release 15.5, ANSYS, Inc, November 2013b.
- Arya, S. P. S.; Shipman, M. S. **An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer Over a Ridge**. Atmosph, Environ, 1981.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - **Norma Brasileira: cargas de vento em Edificações - NBR 6123 (NB-599): forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.
- Blessmann, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995.
- Blocken, B.; Stathopoulos, T. Carmeliet, J. **CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems**, Atmospheric Environment 41(2): 238-252. Elsevier 2007.
- Britter, R. E.; Hunt, J. C. R.; Richards, K. J. **Air Flow Over Two-dimensional Hill: Studies of Velocity Speedup, Roughness Effects and Turbulence**. Quad. J. Roy Meteorol Soc. 1981.
- Burton, T.; Jenkins, N.; Sharpe, D.; Bossanyi, E. **Wind energy handbook**. 2ª Edição. John Wiley & Sons, 2011.
- CALIFORNIA REGIONAL WIND ENERGY FORECASTING SYSTEM DEVELOPMENT. Volume 3: **Wind Tunnel Modeling of Wind Flow over Complex Terrain**. California: Electric Power Research Institute, 2006.
- Castro, I. P.; Apsley, D. D. **Flow and Dispersion Over Topography: a Comparison Between Numerical and Laboratory Data for Two-dimensional Flows**. Atmos, Environ 1997.
- Castro, R. M. G. **Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

Custódio, R. S. **Energia Eólica Para Produção de Energia Elétrica**. Synergia Editora, Rio de Janeiro, 2009.

De Freitas Filho, D. G. R. **Análise da aplicação da dinâmica dos fluidos computacional para avaliação do potencial eólico em terrenos complexos**. UFRGS, Porto Alegre, 2012.

Fallo, D. **Wind Energy Resource Evaluation in Site of Central Italy by CFD Simulations**. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI. Cagliari, Italia 2007.

Ferreira, A. D. et al. **Experimental and Numerical Simulation of Flow around Two Dimensional Hills**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics v.54/55, 1995.

Fox, R. W.; McDonald A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, Rio de Janeiro, 2001.

Hurley, P. J. **An Evaluation of Several Turbulence Schemes for the Prediction of Mean and Turbulent Fields in Complex Terrain**. Boundary Layer Meteorol. 1997.

Iizuka, S.; Kondo, H. **Performance of Various Sub-grid Scale Models in Large Eddy Simulations of Turbulent Flow Over Complex**. Atmos, Environ, 2004.

Jackson, P. S.; Hunt, J. C. R. **Turbulent Wind Flow Over a Low Hill**. Quart. J. Roy Meteorol Soc. 1975.

Kármán, T. von. **Aerodynamik**. Genebra: Interavia, 1956.

Kothe, L. B.; **Estudo Comparativo Experimental e Numérico Sobre o Desempenho de Turbinas Savonius Helicoidal e de Duplo-Estágio**. UFRGS, Porto Alegre, 2016.

Lazeroms, Werner M.J., **Turbulence modelling applied to the atmospheric boundary layer**, Technical Report, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, Sweden, 2015.

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.

Loureiro, J. B. R.; Alho, A. T. P., Silva Freire, A. P. **The Numerical Computation of Near Wall Turbulent Flow Over a Steep Hill**. J. Wind Eng. Ind. Aero, 2008.

Loureiro, J. B. R.; Vasques, F. S.; Rodrigues, D. A.; Terra, R. J.; Silva Freire, A. P. **A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow Over Hills. Part I: Smooth Changes in Surface Elevation.** ENCIT2000, Porto Alegre, 2000a.

Loureiro, J. B. R.; Vasques, F. S.; Rodrigues, D. A.; Terra, R. J.; Silva Freire, A. P. **A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow Over Hills. Part II: Large Changes in Surface Elevation.** ENCIT2000, Porto Alegre, 2000b.

Maliska, C. R. **Transferencia de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** LTC, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2004.

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

Mason, P. J.; Sykes, R. I. **Flow Over an Isolated Hill of Moderate Slope.** Quart. J. Roy Meteorol Soc. 1979.

Mattuella, J.M.L. **The evaluation of wind tunnel behavior of atmospheric boundary layer in complex terrain.** Thesis, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

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.; Silvestrini, J. H. **Turbulência: Fundamentos**, v. 4. ABCM, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

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.

Snel, H.; Schepers, J. **Investigation and Modelling of Dynamic Inflow Effects.** EWEC '93 Conference, Travemünde, 1993.

Svensson, V.; Haggkvist, K. **A Two Equation Turbulent Model for Canopy Flows.** J. Wind Eng. Ind. Aero, 1990.

Taylor, D. **Renewable Energy – Power for a Sustainable Future.** 2004

Vecina, T. D. J.; Luz, J. L. R.; Fleck, G. D.; Petry, A. P. **Application of Computational Fluid Dynamics for Evaluation of Wind Power Potential in Simple Terrain.** ICWE 14. Porto Alegre, Brazil, 2015.

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

APÊNDICE A

```

#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 = 10;        /*VELOCIDADE DE REFERENCIA*/
    real P1 = 0.23;        /*EXPOENTE RUGOSO 0.23*/
    real P2 = 0.23;        /*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)
}

```