



• C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Previsão numérica do vento em torno de topografia complexa- dependência de parâmetros de simulação e comparação com resultados experimentais

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Pedro Julien Fernandes Silva Jeanmonod

Orientadores

**Professor Doutor António Gameiro Lopes
Marcelo Romero de Moraes (UNIPAMPA)**

Júri

Presidente Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, julho de 2015

“Quanto mais aumenta o nosso conhecimento, mais evidente fica a nossa ignorância”.

John F. Kennedy

Aos meus pais.

Agradecimentos

O presente trabalho só foi possível graças à colaboração de várias pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu agradecimento e reconhecimento.

Ao professor António Gameiro Lopes, pela orientação, disponibilidade e paciência que demonstrou ter tido ao longo da realização deste trabalho que contribuiu para o meu desenvolvimento cognitivo. Um obrigado.

Aos meus colegas e amigos de curso, pela ajuda e apoio que me deram durante estes cinco anos e pelos momentos de diversão proporcionados durante a minha vida académica.

Aos meus pais e familiares, que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos da minha vida e que contribuíram fortemente para o meu êxito na minha vida académica.

Resumo

A previsão numérica do vento em torno de topografias complexas, continua a ser um grande desafio nos dias de hoje. Existe uma grande necessidade de compreender o seu comportamento para diversos fins e até mesmo para o estudo de possíveis impactos que possam ser causados pela própria natureza, tais como as tempestades.

Sabe-se que o principal objetivo da simulação numérica é obter resultados próximos da realidade e que nos últimos anos, com os grandes avanços da tecnologia, esta ferramenta passou a ter uma grande fiabilidade na resolução de problemas em diversas áreas. Daí que se espera que os resultados que foram obtidos tenham uma boa margem de veracidade para o possível comportamento do vento em diferentes cenários.

Com o presente trabalho foi possível concluir que o comportamento do vento em diversos locais é fortemente influenciado pelas topografias que caracterizam esses locais. Dependendo do tipo de topografia do terreno em estudo, os resultados obtidos através das simulações podem ter uma convergência clara (produzindo resultados de fácil e rápida interpretação), ou ter uma convergência mais difícil (produzindo resultados mais complexos e de difícil compreensão).

Constatou-se também que determinados parâmetros de simulação e condições de fronteira, podem introduzir alterações significativas nos resultados obtidos através das simulações, podendo estes alterar completamente a maneira de como o escoamento incidente interage com as diferentes topografias.

Palavras-chave: Vento, Topografia, Parâmetros, Simulação, Condições de Fronteira.

Abstract

Predict the wind behaviour around complex topographies, remains a great challenge in nowadays. There is a great need to understand his behaviour for different purposes, and even for the study of possible impacts that can be caused by nature.

It is known that the main goal of numerical simulation is to obtain results close to the reality and that in the last years, with the technology advances, this tool has now a great reliability in the resolution of problems in several areas. So it is expected that the obtained results have a good truthfulness margin for the possible wind behaviour in this different scenarios.

With the present work it was possible to conclude that the wind behaviour in several places is strongly influenced by the topographies of these places. Depending on the topography that characterizes the terrain in study, the results obtain through the simulations can have a clear convergence, (producing results of easy and quick understanding) or have a difficult convergence (producing more complex results of difficult understanding). It was also found that certain simulation parameters and boundary conditions, can introduce significant changes in the results obtained through the simulations, and that might change the way that the flow interacts with the different topographies.

Keywords Wind, Topography, Parameters, Simulations, Boundary Conditions

ÍNDICE

Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Simbologia.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Breve revisão bibliográfica.....	2
1.2. Aplicações.....	4
1.3. Objetivos.....	5
2. CONCEITOS TEÓRICOS	7
2.1. Conceito de Vento	7
2.2. Definição de Escoamento	7
2.3. Camada limite atmosférica	8
2.4. Força de Coriolis.....	9
2.5. Conceitos relativos ao funcionamento do programa WindStation	9
3. ESTUDO DO CASO ASKERVEIN	17
3.1. Validação dos resultados obtidos para o caso Askervein	18
3.2. Estudo da influência dos parâmetros de simulação	25
4. ESTUDO DO CASO SERRA DA LOUSÃ.....	33
4.1. Resultados obtidos no ponto P1	34
4.2. Resultados obtidos ao longo das linhas B e C	35
4.3. Estudo da influência dos parâmetros de simulação	40
5. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	49
5.1. Estudo da influência da rugosidade do terreno.....	49
5.2. Estudo da influência do tipo de atmosfera.....	50
6. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Camada limite atmosférica	8
Figura 2- Efeito da Força de Coriolis	9
Figura 3-Ilustração do funcionamento do programa WindStation	11
Figura 4- Domínio com diferentes malhas	14
Figura 5-Domínio de Askervein com diferentes extensões.....	14
Figura 6-Domínio de Askervein com diferentes orientações	15
Figura 7-Perfil de velocidade do vento nas diferentes camadas atmosféricas	16
Figura 8-Monte Askervein	17
Figura 9-Representação do domínio de Askervein.....	18
Figura 10-Resultados obtidos no ponto Ht.....	19
Figura 11-Resultados obtidos para K^* no ponto Ht	20
Figura 12-Comparação dos resultados obtidos para o ponto Cp com o estudo de Castro Palma.....	20
Figura 13-Resultados obtidos ao longo da linha A.....	21
Figura 14-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*	22
Figura 15-Comparação dos resultados obtidos ao longo da linha AA, com o estudo de Castro Palma.....	22
Figura 16-Visualização do escoamento ao longo da linha A	23
Figura 17-Visualização do escoamento ao longo da linha AA	23
Figura 18-Visualização do escoamento no plano horizontal à altura de 10 metros	24
Figura 19-Influência do número de pontos exportados no contorno das curvas.....	24
Figura 20-Resultados obtidos no ponto Ht para diferentes níveis verticais	26
Figura 21-Comparação dos resultados obtidos para K^* com o estudo de Raithby	26
Figura 22-Ilustração de diferentes orientações do domínio (30 e 0 °).....	27
Figura 23-Resultados obtidos para os perfis verticais (ponto Ht)	27
Figura 24-resultados obtidos para os perfis verticais (ponto Ht) (K^*).....	28
Figura 25-Resultados obtidos ao longo da linha A (Δs).....	28
Figura 26-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*	28
Figura 27-Ilustração das diferentes extensões do domínio estudadas	29
Figura 28-Resultados obtidos no ponto Ht para as diferentes extensões estudadas.....	30
Figura 29-Resultados obtidos ao longo da linha A para as diferentes extensões estudadas	30
Figura 30-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*	31
Figura 31-Serra da Lousã	33
Figura 32-Domínio do caso Serra da Lousã	34

Figura 33-Resultados obtidos para o ponto P1 (Ds e K*).....	34
Figura 34-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros (Ds e K*) em função da malha.	35
Figura 35-Resultados obtidos ao longo da linha B (Ds e K*).....	36
Figura 36-Resultados obtidos ao longo da linha em função da Malha (m).....	36
Figura 37-Esquemática da representação dos resultados relativos aos pontos P1, 1 e 236	
Figura 38-Resultados obtidos ao longo da linha C	37
Figura 39-Esquemática da representação dos resultados relativos aos pontos P1 1 e 2 para a linha C	37
Figura 40-Resultados obtidos ao longo da linha C em função da Malha (m).....	37
Figura 41-Comparação entre os resultados obtidos para os perfis horizontais dos casos Askervein e Serra da Lousã	38
Figura 42-Perfis dos escoamentos ao longo das linhas B e C (Velocidade)	39
Figura 43-Perfis dos escoamentos ao longo das linhas B e C (Turbulência).....	39
Figura 44-Distribuição da velocidade e turbulência ao longo do domínio a 10m	39
Figura 45-Ilustração da influência do número de pontos exportados (relativos aos resultados)	40
Figura 46-Resultados obtidos referentes à influência da malha vertical (ponto P1).....	41
Figura 47-Ilustração de diferentes orientações do domínio (0 e 10 °).....	42
Figura 48-Resultados obtidos para os perfis verticais para as diferentes orientações (Ds)	42
Figura 49-Resultados obtidos para os perfis verticais (K*)	42
Figura 50-Resultados obtidos ao longo da linha B (Ds)	43
Figura 51-Resultados obtidos ao longo da linha b (K*).....	43
Figura 52-Ilustração das diferentes extensões do domínio estudadas.....	44
Figura 53-Resultados obtidos para os perfis verticais para o ponto P1	44
Figura 54-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para Δs (Ponto P1)	45
Figura 55-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para a energia cinética de turbulência (K*) (ponto P1).....	45
Figura 56-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para o speed up ao longo da.....	46
Figura 57-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para a energia cinética de turbulência ao longo da linha B	46
Figura 58-Mapa de velocidades para as situações estudadas	48
Figura 59-Resultados obtidos nos perfis verticais para diferentes rugosidades (Ht)	49
Figura 60-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros em função da rugosidade	49

Figura 61-Resultados obtidos ao longo da linha A para as diferentes rugosidades estudadas	50
Figura 62-Resultados obtidos para diferentes tipos atmosfera no ponto Ht.....	51
Figura 63-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros em função do gradiente de temperatura	51
Figura 64-Resultados obtidos ao longo da linha A para os diferentes tipos de atmosferas	51
Figura 65-Resultados obtidos para os pontos 1,P1 e 2 para as diferentes atmosferas estudadas	52
Figura 66-Mapa de distribuição da velocidade e turbulência para uma atmosfera estável .	53
Figura 67- Mapa de distribuição de velocidade e turbulência para uma atmosfera instável	53

SIMBOLOGIA

ρ -Densidade $[\text{kg/m}^3]$

t -Tempo $[\text{s}]$

x_i -Coordenada cartesiana $[\text{m}]$

p -Pressão $[\text{N/m}^2]$

$\Gamma = \mu_{eff}$ -Coeficiente de difusão $[\text{Ns/m}^2]$

k -Energia cinética de turbulência $[\text{m}^2/\text{s}^2]$

S_{ui} -Coeficiente de porosidade

T -Temperatura $[\text{°C}]$

β -Coeficiente de expansão térmica

Pr -Número de Prandtl para regime laminar

Pr_t -Número de Prandtl para regime turbulento

C_p -Calor específico $[\text{Jkg/K}]$

V -Velocidade $[\text{m/s}]$

ε -Taxa de energia cinética de turbulência $[\text{m}^2/\text{s}^3]$

T_i -Intensidade de turbulência

Δs -Speed Up

$V(Z)$ -Velocidade à altura referida $[\text{m/s}]$

$V(Z_{rs})$ -Velocidade no local de referência $[\text{m/s}]$

X^* -Extensão horizontal da encosta $[\text{m}]$

X_{pt} -Coordenada do ponto de referência $[\text{m}]$

Y_{pt} -Ordenada do ponto de referência $[\text{m}]$

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos que o interesse por parte do ser humano em compreender o que o rodeia tem-se destacado através da evolução da tecnologia. Ao longo do tempo foram sendo desenvolvidas novas técnicas de cálculo baseadas em conceitos teóricos que permitiram passar a compreender melhor os diversos fenómenos e até a fazer novas descobertas que muitas vezes são comprovadas com resultados experimentais. A introdução destas ferramentas sempre teve como principal objetivo a obtenção de resultados minimamente fiáveis sem que houvesse a necessidade de recorrer a grandes recursos económicos e humanos. (ex: projetos de aeronaves, medições em locais perigosos).

O estudo do comportamento do vento tem, deveras, grandes aplicações e perceber a maneira como este interage com a superfície terrestre continua a ser alvo de muitos estudos. Sabe-se por exemplo que a velocidade do vento tende a aumentar com a altura e que a turbulência tende a ser um resultado da interação do escoamento com o meio envolvente, mas o facto é que existem muitas condições que podem alterar ou condicionar esta tendência.

Para o estudo da interação do vento em torno das diferentes topografias, utilizou-se o programa WindStation (Lopes 2003), tendo este por base a resolução das equações de Navier-Stokes, Energia e Continuidade. O WindStation é um programa destinado a simular numericamente escoamentos turbulentos em torno de topografias complexas, sendo necessário, antes de efetuar o cálculo, que seja selecionada uma malha de cálculo e que seja carregado um ficheiro em que constem a elevação e rugosidade do terreno em estudo. O programa tem como base de cálculo um ficheiro de dados relativos a observações que foram efetuadas previamente e recorrendo ao solver Canyon, irá resolver as equações de Navier-stokes, Energia, Continuidade e obter os valores relativos à turbulência que é modelada pelo modelo ($\kappa-\epsilon$).

O trabalho encontra-se dividido em 6 partes, (Revisão Bibliográfica; Conceitos Teóricos, Estudo do caso Askervein, Estudo do caso serra da Lousã, Estudo da influência das condições de fronteira e Conclusões).

No capítulo 1 – Revisão Bibliográfica - é feita uma introdução ao tema deste estudo com base nos conhecimentos sobre ele já existentes e divulgados pela comunidade científica, bem como uma breve referência às suas possíveis aplicações. São também apresentados os objetivos orientadores do trabalho.

No capítulo 2 são introduzidos alguns conceitos teóricos que são importantes para uma boa compreensão dos resultados obtidos e do funcionamento do programa WindStation.

Nos capítulos 3 e 4 são estudados os casos Askervein e Serra da Lousã nas mesmas condições de fronteira, com o objetivo de entender qual o comportamento do vento perante os casos de uma topografia simples e complexa. No capítulo 3 os resultados obtidos para o caso Askervein são comparados e validados com outros que foram obtidos em estudos para o mesmo caso. Nestes capítulos é também estudada a influência de alguns parâmetros de simulação, tais como o efeito da malha, a extensão e orientação do domínio na obtenção de resultados, sendo também feita a análise e a interpretação dos resultados obtidos.

No capítulo 5 é estudada a influência das condições de fronteira nos resultados obtidos, isto é, são feitos cálculos em que são variadas a rugosidade e a atmosfera, variáveis nas quais, nos capítulos anteriores, foram considerados sempre os mesmos valores.

No capítulo 6 é feito um balanço geral de como decorreram os procedimentos dos trabalhos e são também apresentadas as conclusões que foram tiradas através da realização do presente trabalho.

1.1. Breve revisão bibliográfica

Neste subcapítulo irá ser apresentada alguma pesquisa feita acerca do tema em questão.

Sabe-se que o estudo do comportamento do vento sempre teve grande relevância em diversas áreas, entre elas, na meteorologia e no investimento de energia eólica. Porém, prever o comportamento do vento em torno de superfícies complexas continua a representar um grande desafio para testar a credibilidade dos resultados obtidos através da simulação numérica.

Teunissen *et al.* (1986) estudaram a fiabilidade do uso de protótipos em ensaios com túneis de vento, em que o principal objetivo era tentar reproduzir as condições mais próximas da realidade e entender quais são os impactos de se usar determinados modelos aproximados (superfície, rugosidade, escala do modelo, técnicas de medição...). A conclusão mais genérica a que chegaram foi a de que os ensaios feitos por túneis de vento são uma boa maneira de modelar o escoamento da camada limite sobre montanhas isoladas de baixa altitude.

Taylor *et al.* (1986), através do projeto Askervein, estudaram numericamente o escoamento da camada limite em torno de colinas baixas, sob a orientação de um programa de uma agência de sistemas de conversão de energia eólica. Entre as conclusões a que chegaram destacam-se os resultados positivos na previsão do escoamento da camada limite atmosférica à volta de topografias isoladas.

Raitby *et al.* (1987) aplicaram um modelo numérico não linear tridimensional, anteriormente utilizado na prevenção do escoamento da água na natureza, para estudar o comportamento do escoamento em torno de uma colina isolada (Askervein), sendo essas previsões feitas para condições de atmosfera neutra e ventos dominantes provenientes de 210° e 180 ° norte da colina. Uma das conclusões deste estudo foi a de que os valores de energia cinética de turbulência, medidos no local de referência, foram mais baixos do que os que eram expectáveis. Porém, os valores do *speed up* mostraram uma boa concordância com os que foram obtidos no terreno.

E. Davakis *et al.* (1997), usando um campo de vento gerado a partir da recolha de dados meteorológicos, tentaram estimar a dispersão de SO_2 sobre um terreno de topografia complexa tendo concluído que, apesar das incertezas meteorológicas provenientes de dados inadequados, a comparação dos valores diários, obtidos computacionalmente através das observações, indicam um desempenho médio do modelo próximo do das observações realizadas.

Hyun Goo Kim *et al.* (1999) estudaram o escoamento em torno de vários terrenos montanhosos (cume Ridge, colina Kettles, colina Askervein e vale Sirhowy) recorrendo a simulações baseadas nas equações de Navier-Stokes, sendo a turbulência modelada pelo modelo ($\kappa-\epsilon$) desprezando a aproximação hidrostática. Comparando os dados recolhidos nos quatro sítios estudados foi possível concluir que havia uma boa concordância entre os valores obtidos numericamente e os medidos experimentalmente. A

inclusão de outras zonas topográficas vizinhas, no domínio computacional, revelou-se importante na previsão do escoamento na zona de separação.

Castro Palma *et al.* (2002) estudaram o escoamento em torno da colina Askervein, usando uma sistema de acompanhamento do terreno e um modelo de turbulência ($\kappa-\epsilon$) a duas equações. Neste estudo foi possível obter bons resultados até para malhas relativamente grosseiras, ou seja, não foi necessário recorrer as grandes potências de cálculo para obter resultados fiáveis

Sarah J. Wakes *et al* (2009), recorrendo a um modelo numérico bidimensional concebido para testar vários pressupostos de modelização e comparar com dados obtidos experimentalmente, estudaram o escoamento em torno de um sistema complexo de dunas com forma parabólica, situado na baía de Mason (ilha Stewart), na Nova Zelândia, tendo concluído que a modelização do escoamento em torno da superfície é importante mas, também, a maneira com a vegetação é modelada apresenta implicações sobre os resultados. Foi ainda constatado que é possível, através da partição do domínio, realizar cálculos com malhas mais densas em áreas geometricamente mais pequenas.

1.2. Aplicações

Recorrer a simulações numéricas para os estudos de diversos fenómenos, em diferentes áreas, tem sido um prática comum e prever os seus comportamentos com exatidão continua a ser um dos objetivos principais para muitos investigadores.

O comportamento do vento junto a superfícies de natureza complexa irá depender de muitas variáveis tais como a rugosidade do terreno, o tipo de atmosfera, o grau de complexidade da própria topografia, etc. Em situações reais sabe-se que os terrenos nunca possuem rugosidades iguais, nem geometrias semelhantes em toda a sua extensão, daí que uma boa modelização do terreno irá claramente influenciar a qualidade dos resultados obtidos. Desta forma, conhecer a influência de todos estes parâmetros irá permitir obter conhecimentos mais aprofundados sobre o comportamento do vento dentro da camada limite atmosférica, sendo estes vantajosos em inúmeras áreas, tais como na área da construção, engenharia, aeronáutica, meteorologia.

Relativamente ao tipo de atmosfera, apesar da atmosfera neutra ser a mais usada em estudos anteriormente feitos (devido ao facto de ser a que menos influencia o comportamento do escoamento na interação com o meio), sabe-se que, na realidade, o

meio em que o terreno em estudo se insere pode estar exposto a outros tipos de atmosfera. Atmosferas do tipo estável ou instável são fatores que resultam na introdução de grandes alterações ao nível comportamental do vento e na obtenção de resultados.

Por fim é importante também estudar a maneira como os parâmetros de simulação irão influenciar os resultados, isto é perceber de que forma parâmetros tais como a malha, extensão e orientação do domínio influenciam os resultados obtidos, de maneira a que se possa tirar maior partido da capacidade de cálculo que o modelo numérico nos disponibiliza.

1.3. Objetivos

Os dois objetivos do presente trabalho foram: i) o estudo do comportamento do vento em torno de diferentes tipos de topografia e ii) a influência dos parâmetros de simulação e das condições de fronteira na obtenção dos resultados.

Para atingir tais objetivos, foram feitos dois tipos de estudos. Numa primeira fase, foram feitas várias simulações para o caso Askervein, com o intuito de comparar e validar os resultados deste estudo com resultados provenientes de outros estudos. Depois passou-se ao estudo do caso Serra da Lousã, procurando fazer as simulações com as mesmas condições de fronteira e variando os mesmos parâmetros de simulação usados no caso Askervein.

Após o estudo destes dois casos distintos, optou-se por estudar a influência das condições de fronteira no caso Askervein, fazendo simulações em que se variaram parâmetros tais como a rugosidade do terreno e tipo de atmosfera.

2. CONCEITOS TEÓRICOS

O presente capítulo destina-se essencialmente em definir alguns conceitos importantes para uma boa compreensão dos resultados e conclusões que foram obtidos através do presente trabalho.

2.1. Conceito de Vento

Pode definir-se vento como sendo a deslocação do ar resultante das diferenças de pressão entre duas regiões diferentes. O diferencial de pressão entre dois locais adjacentes resulta no movimento do ar da zona de maior pressão (anticiclone) para a zona de menor pressão (ciclone). Tais diferenças de pressão podem ser também geradas por diferenças térmicas, que estão relacionadas com a radiação solar e por processos de aquecimento das massas de ar. Junto à superfície, o vento desloca-se segundo a direção horizontal, sendo este caracterizado por várias variáveis, tais como a direção, o tipo, a intensidade e a interação de ventos.

2.2. Definição de Escoamento

O escoamento de um fluido define-se como o movimento e interação das suas partículas com o meio envolvente. No presente caso em estudo pode definir-se o escoamento como externo, visto que este provém do exterior do domínio em estudo.

O escoamento pode ocorrer em dois regimes: laminar ou turbulento.

“Um escoamento laminar ocorre quando as camadas de fluido adjacentes se deslocam com a mesma velocidade, ou deslizam ente si de forma relativamente ordenada se a sua velocidade for ligeiramente diferente, nunca se cruzando nem intersectando. Se, pelo contrário, camadas contíguas de fluido se movem com velocidades claramente distintas e trajetórias individuais de elementos de fluido se cruzam ou se intersectam de forma aparentemente aleatória, então o escoamento é dito turbulento” (Oliveira e Lopes, 2007, p.167).

Os escoamentos podem ser também caracterizados como unidimensionais, bidimensionais, permanentes e livres, entre outros. Escoamentos unidimensionais são

escoamentos cujas propriedades (velocidade, pressão...) dependem apenas de uma única coordenada espacial e do tempo. Escoamentos bidimensionais caracterizam-se por ser escoamentos que ocorrem em planos paralelos e segundo trajetórias semelhantes, não havendo escoamento segundo a direção normal aos planos. Diz-se que um escoamento é permanente quando este mantém as suas propriedades constantes ao longo do tempo. Escoamentos livres são escoamentos que ocorrem quando todas as secções transversais do fluido estão em contacto com a atmosfera (exemplo: rios, quando são originados pela ação da gravidade).

2.3. Camada limite atmosférica

O estudo do comportamento do vento dentro desta zona sempre foi alvo de investigação nas diferentes áreas (engenharia, meteorologia), essencialmente por ser a zona onde o vento interage diretamente com a superfície terrestre e por ser onde ocorrem muitos fenómenos que estão diretamente relacionados com o aquecimento terrestre proveniente da radiação solar.

A camada limite atmosférica (figura 1) é uma zona que se situa na baixa troposfera, compreendida entre os 0 e 2000 metros de altitude. Devido à sua localização, o comportamento do vento nesta zona irá ser influenciado pelos fatores topográficos da superfície da envolvente. Fora desta camada o comportamento do vento deixa de estar dependente dos fatores topográficos da superfície e passa a estar sujeito à influência da Força de Coriolis.

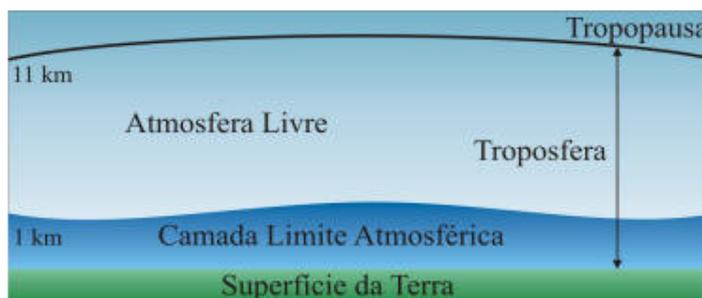


Figura 1- Camada limite atmosférica

(Fonte:www.iag.usp.pt)

2.4. Força de Coriolis

A força de Coriolis (figura 2), embora teoricamente não seja considerada como força, atua quando um objeto se encontra em movimento em relação ao referencial não inercial em consideração, sendo sempre esta perpendicular à velocidade e ao eixo de rotação do sistema inercial. Esta força é a responsável pela mudança de direção do movimento do vento, devido à rotação da Terra e atua para a esquerda no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério Norte.

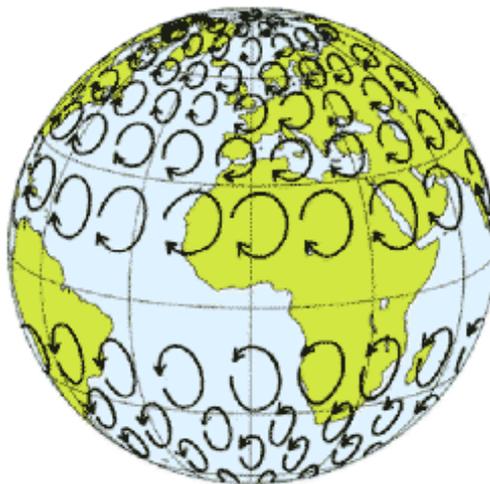


Figura 2- Efeito da Força de Coriolis

(Fonte:Wikipedia)

2.5. Conceitos relativos ao funcionamento do programa WindStation

Neste subcapítulo pretende-se dar a conhecer alguns conceitos relativos ao funcionamento do programa WindStation (Lopes 2003).

2.5.1 Equações de base

Conforme já mencionado anteriormente, o cálculo numérico tem por base a resolução das equações de Navier-Stokes, da Continuidade e Energia.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que se destinam a descrever o escoamento de um fluido, em que as derivadas parciais permitem determinar os campos de velocidade e de pressão do escoamento. As equações de Navier-Stokes

estabelecem que alterações no momento e na aceleração de uma partícula, resultam das mudanças de pressão e das forças viscosas dissipativas que atuam no fluido. No nosso caso em concreto são apresentadas na forma (aplicada ao programa WindStation):

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} + S_{ui} + \rho g \beta (T - \theta)$$

(2.1)

Onde:

$\rho(\text{kg/m}^3)$ Representa a densidade,

$t(\text{s})$ Representa o tempo,

$x_i(\text{m})$ É uma coordenada cartesiana,

$p(\text{N/m}^2)$ Representa a pressão,

$\Gamma = \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t (\text{Ns/m}^2)$ Representa o coeficiente de difusão.

Neste caso a derivada da energia cinética de turbulência ($k(\text{m}^2/\text{s}^2)$) é adicionada à equação devido ao modelo de turbulência que é usado no cálculo.

O termo S_{ui} representa o coeficiente de porosidade e é usado quando o escoamento atravessa camadas de corpos porosos como por exemplo árvores.

O último termo da equação representa as forças de impulsão entre o gradiente de temperatura $\frac{dt}{dz}$ e o gradiente adiabático de temperatura. O parâmetro T, representa a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), β representa o coeficiente de expansão térmica, e θ representa a temperatura correspondente ao gradiente adiabático.

A equação da continuidade, estabelece que num sistema isolado, quando o fluido se desloca de um local para outro, existe conservação da sua massa. A equação da continuidade é dada por:

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

(2.2)

Por fim a equação da conservação da energia estabelece que a energia total de um sistema isolado permanece constante. Portanto pode dizer-se que não existe entrada nem saída de energia, mas sim transformação desta. Esta equação é definida por:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p w T) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial T}{\partial z}) \tag{2.3}$$

O coeficiente de difusão é dado por:

$$\Gamma = (\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu}{Pr_t})c_p \tag{2.4}$$

onde: Pr e Prt, representam os números de Prandtl para os regimes laminar e turbulento;

C_p (J.kg/K), representa o calor específico.

A maneira de como a convergência é alcançada, em função do número de iterações realizadas pelo programa WindStation na realização do cálculo, encontra-se representada na figura 3.

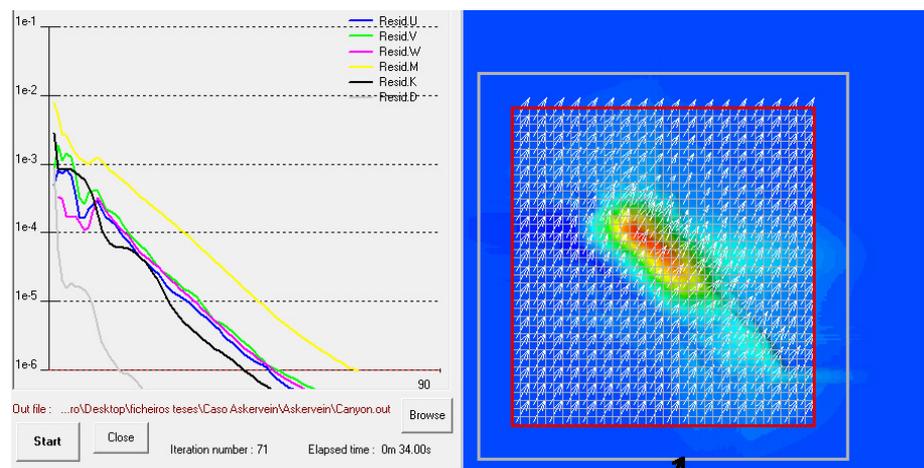


Figura 3-Illustração do funcionamento do programa WindStation

2.5.2 Modelo de Turbulência ($\kappa-\varepsilon$)

O modelo ($\kappa-\varepsilon$) tem sido muito usado no estudo de escoamentos em torno de topografias complexas, devido ao facto de apresentar resultados mais concordantes com os que são obtidos experimentalmente.

É importante mencionar que as propriedades de um escoamento que se encontra em regime turbulento não são constantes no tempo e que para isso é necessário a utilização de um modelo de turbulência que nos permita saber quais as variações das propriedades desse fluido ao longo do escoamento. Devido a estas complicações, este modelo permite-nos calcular os valores médios dessas propriedades ao longo do escoamento através da decomposição de Reynolds.

$$\hat{\phi} = \phi + \phi' \tag{2.5}$$

Através da aplicação desta decomposição das equações de transporte, novos termos irão surgir na equação com as unidades de uma tensão, podendo estes termos também ser expressos como o produto de uma viscosidade (turbulenta) por um gradiente de velocidades médias. A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \tag{2.6}$$

em que a energia cinética de turbulência $k(m^2 / s^2)$ é dada por:

$$T_i = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}k}{V} \Rightarrow k = \frac{3}{2}(T_i V)^2 \tag{2.7}$$

onde:

V representa a velocidade;

ε Representa a taxa de dissipação de energia cinética de turbulência;

T_i Representa a intensidade de turbulência.

A energia cinética de turbulência e a sua taxa de dissipação são calculadas através das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + P_1 + G - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P_1 + C_1 C_3 G - C_2 \rho \varepsilon) + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

em que os termos S_k e S_ε são utilizados na presença de materiais ou objetos porosos e o termo P_1 representa a taxa de produção de k de acordo com os resultados dos gradientes de velocidade, sendo este dado por:

$$P_1 = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

2.5.3 Parâmetros de simulação e condições de fronteira

Pode-se definir parâmetros de simulação como ferramentas auxiliares que atuam dentro do domínio em estudo, influenciando diretamente a convergência dos resultados.

Como os parâmetros de simulação atuam apenas no interior do domínio, estes não alteram o comportamento do escoamento incidente na zona de transição (exterior-interior) do domínio.

No presente trabalho recorreu-se a parâmetros tais como a malha, extensão e orientação, com a finalidade de obter resultados com qualidade, assim como a de estudar a sua influência nos resultados obtidos por comparação dos mesmos.

O parâmetro denominado malha pode definir-se como sendo a divisão do domínio de cálculo em porções maiores ou mais pequenas (figura 4), de maneira a produzir

resultados mais precisos. Relativamente aos outros parâmetros (extensão e orientação do domínio) (figuras 5 e 6), estes podem definir-se como o aumento ou diminuição do domínio de cálculo e como o ângulo que o domínio faz com o escoamento incidente.

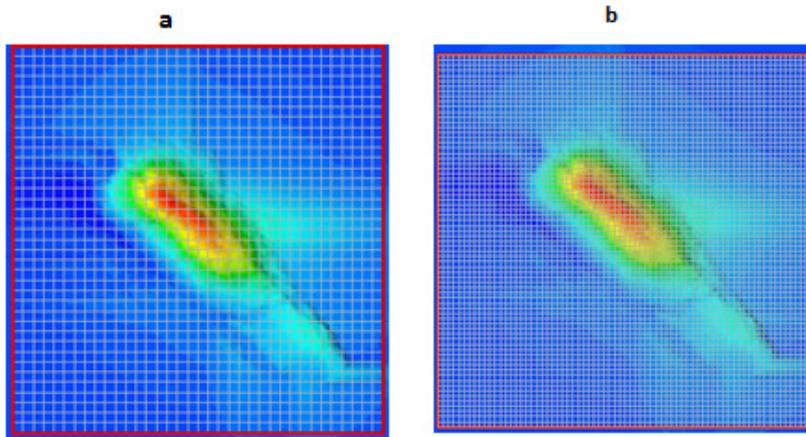


Figura 4- Domínio com diferentes malhas

a)Malha 93.75m b) malha 46.875m

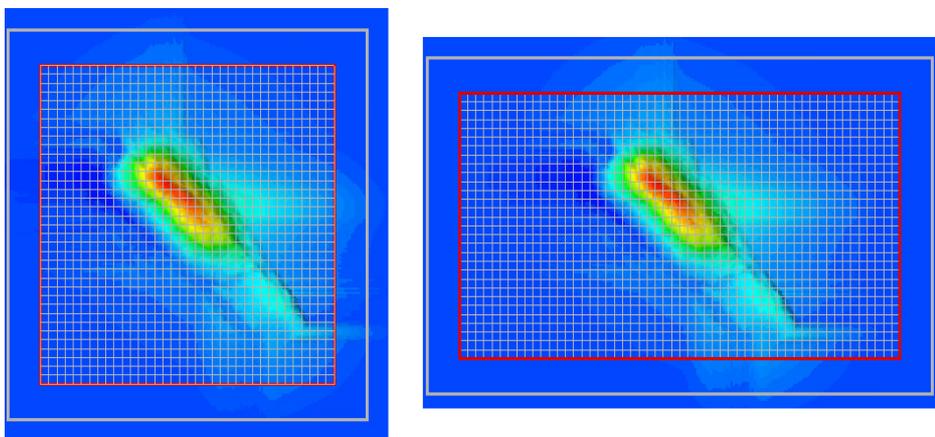


Figura 5-Domínio de Askervein com diferentes extensões

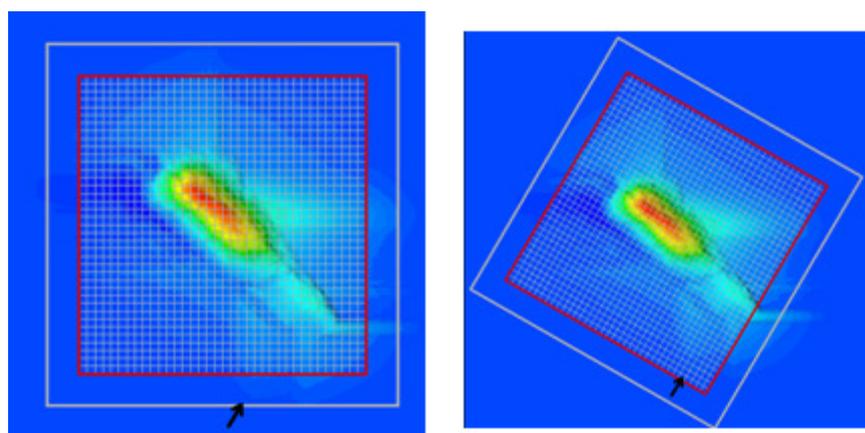


Figura 6-Domínio de Askervein com diferentes orientações

Relativamente às condições de fronteira, estes parâmetros podem definir-se como sendo os dados de entrada para a realização do cálculo.

No presente trabalho, decidiu-se estudar apenas a influência da rugosidade do terreno e do tipo de atmosfera. A rugosidade de um terreno pode definir-se como sendo um conjunto de irregularidades que este apresenta ao longo da sua extensão, sendo a intensidade da sua influência diretamente proporcional ao aumento dessas irregularidades.

Quanto à atmosfera da envolvente, esta pode definir-se como sendo uma fina camada gasosa que envolve o planeta, como consequência da força gravitacional. O planeta pode estar sujeito a diferentes tipos de atmosfera, podendo estas ser classificadas como estáveis, instáveis ou neutras.

A estabilidade ou instabilidade de uma atmosfera define-se pela contribuição, dos efeitos mecânicos do vento e das variações de temperatura (solo/ar), para a geração de turbulência.

Considera-se uma atmosfera do tipo instável quando os fenómenos térmicos contribuem fortemente para a geração de turbulência. Atmosferas do tipo estável, ocorrem quando existe um “amortecimento” da turbulência derivado às variações inversas de temperatura. Por fim, considera-se uma atmosfera do tipo neutra quando a turbulência é gerada essencialmente por efeitos mecânicos.

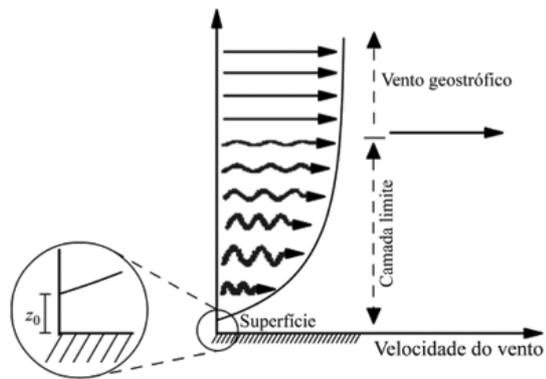


Figura 7-Perfil de velocidade do vento nas diferentes camadas atmosféricas

(Fonte:www.scielo.br)

3. ESTUDO DO CASO ASKERVEIN

Askervein é uma região localizada na Ilha do Sul Uist, Outer Hebrides na Escócia (figura 8), que se caracteriza por ter uma topografia muito suave e de baixa altitude. Esta região foi alvo de vários estudos, essencialmente devido à sua simplicidade na topografia e forma.



Figura 8-Monte Askervein

(Fonte:www.yorku.ca)

No presente capítulo optou-se por estudar o escoamento em torno da topografia de Askervein e comparar os resultados obtidos com os de outros estudos, de maneira a obter-se a validação dos mesmos. Os resultados foram calculados para condições de fronteira constantes, isto é, para uma rugosidade (0.2m) constante em todo o domínio, atmosfera neutra e para os ventos dominantes provenientes de sudoeste (210° com o Norte). As simulações foram feitas para diferentes malhas horizontais [93.75, 70.3125, 46.875 e 23.4375 (m)], começando das menos refinadas para as mais refinadas e para uma malha vertical constante de 20 níveis.

Foi também estudada a influência de parâmetros de simulação, tais como a malha, extensão e orientação do domínio sobre os resultados obtidos.

3.1. Validação dos resultados obtidos para o caso Askervein

No presente estudo, procurou-se fazer com que as simulações numéricas fossem feitas o mais próximo possível das condições em que foram realizados os outros estudos. Os resultados obtidos foram comparados com os estudos que foram feitos por Raithby *et al* (1987) e Castro Palma *et al* (2009).

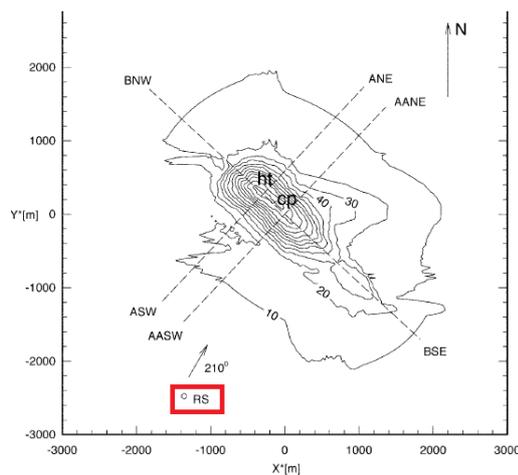


Figura 9-Representação do domínio de Askervein

(Fonte: Manual do utilizador WindStation)

As linhas **AA**, **A** e **B** (figura 9) foram os locais onde se efetuaram as medições das velocidades do vento, para posteriormente comparar com os valores previstos pelos métodos computacionais. Os pontos **Ht** e **Cp** foram os pontos onde se efetuaram as medições da velocidade do vento, em que **Ht** representa o (Hill top) e **Cp** representa um ponto resultante da interseção das linhas **AA** e **B**.

Os resultados obtidos com as simulações encontram-se representados nas figuras 12,13,14 e 15. Os resultados são apresentados em forma gráfica para os parâmetros Δs e K^* em função da altura (Z) (para os pontos **Ht** e **Cp**) e em função da coordenada X^* (m) (para as linha **A** e **AA**). O parâmetro adimensional Δs (2.11) representa o incremento de velocidade com o aumento da altura, que é dado pelo quociente entre a diferença de velocidade à altura referida pela velocidade no local de referência e pela velocidade no local de referência. Relativamente ao K^* (2.12), este fator adimensional é dado pelo quociente entre a energia cinética de turbulência e a velocidade de referência ao quadrado.

É importante mencionar que o valor da velocidade de referência $V(Z_{ref})$ é igual a 10 m/s, velocidade medida a 10 metros de altura.

$$\Delta S = \frac{V(Z) - V(Z_{rs})}{V(Z_{rs})} \tag{2.11}$$

$$K^* = \frac{K}{V(Z_{ref})^2} \tag{2.12}$$

3.1.1. Resultados obtidos para os pontos Ht e Cp

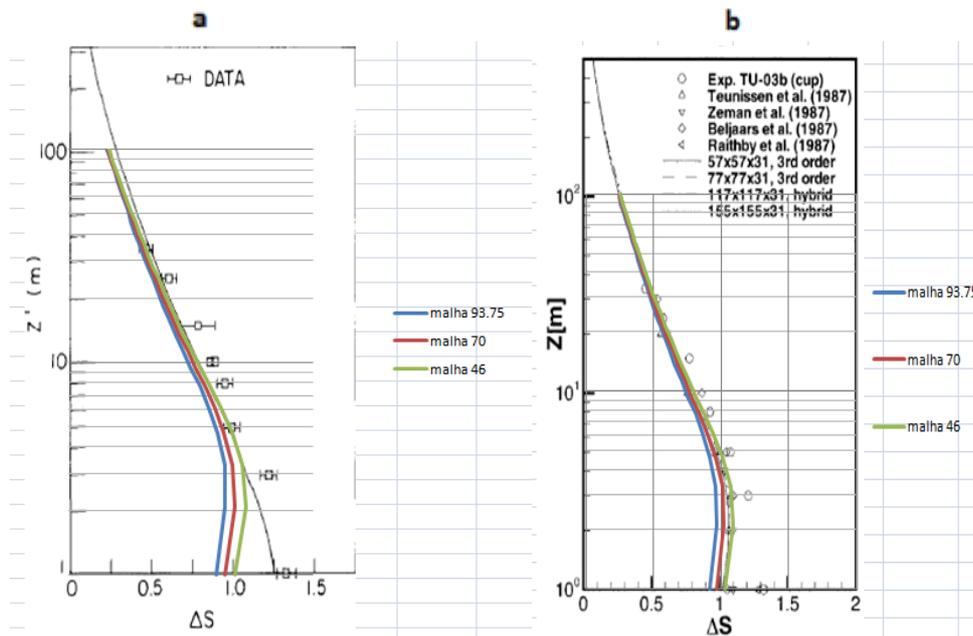


Figura 10-Resultados obtidos no ponto Ht

a)Raithby b)Castro Palma

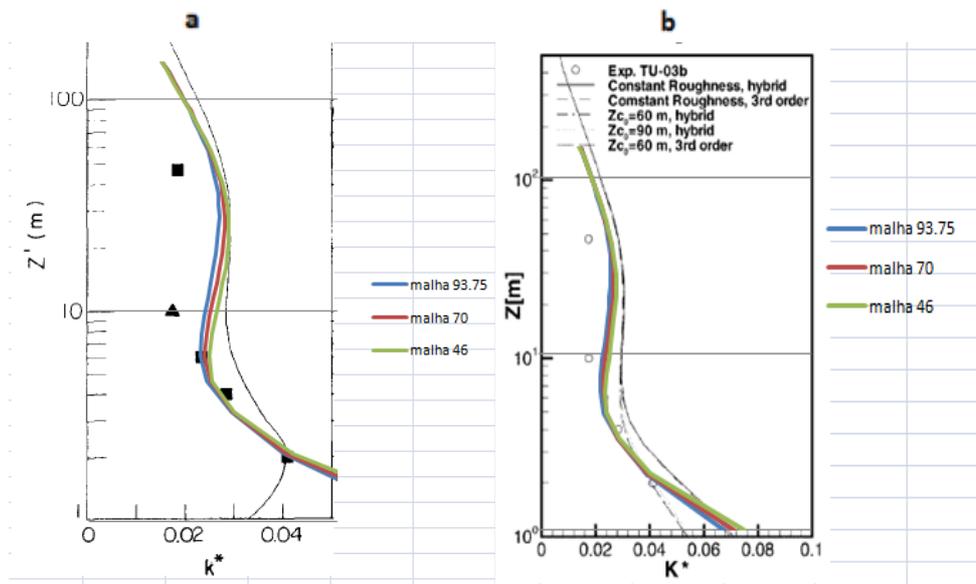


Figura 11-Resultados obtidos para K^* no ponto Ht

a)Raithby b)Castro Palma

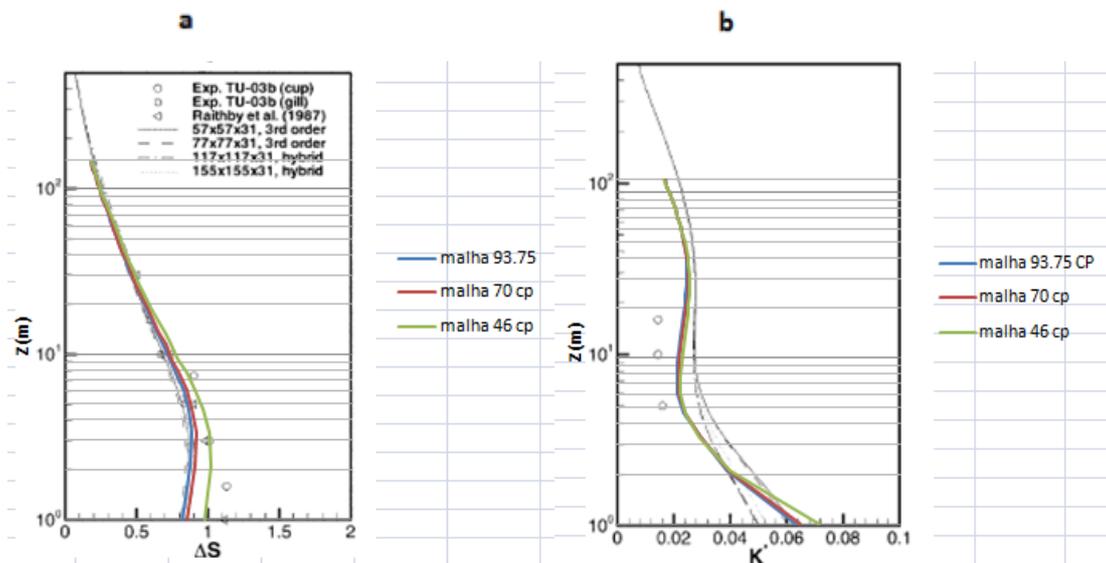


Figura 12-Comparação dos resultados obtidos para o ponto Cp com o estudo de Castro Palma

Analisando as figuras 10, 11 e 12 para os locais **Ht** (Hill top) e **Cp** pode constatar-se que os resultados obtidos com o programa WindStation vão ao encontro dos obtidos nos estudos feitos por Raithby e Castro Palma. Apesar deste fator positivo, constata-se que os resultados obtidos com o programa WindStation tendem a ser mais próximos dos que foram obtidos por Castro Palma do que em relação aos que foram obtidos por Raithby. A principal razão que poderá estar por detrás da ocorrência deste

fenómeno, prende-se com a refinação das malhas que foram usadas no cálculo do estudo feito por Raithby. Provavelmente os recursos informáticos que foram usados na altura não permitiam fazer cálculos para malhas mais refinadas e daí que as diferenças que surgiram em comparação com o presente estudo estejam diretamente ligadas a esta razão.

3.1.2. Resultados obtidos ao longo das linhas A e AA

Após a análise dos gráficos relativos aos pontos **Ht** e **Cp** passou-se ao estudo dos resultados obtidos ao longo das linhas A e AA à altura de referência (10 metros). Nas figuras 13,14 e 15 encontram-se os resultados obtidos para os valores de Δs e K^* assim como os resultados obtidos pelos outros dois estudos efetuados (Raithby e Castro Palma).

Nota: Na obtenção dos resultados relativos aos perfis horizontais, foi necessário exprimir os valores de Δs e k^* em função de X^* ($X^* = \sqrt{(X - X_{pt})^2 + (Y - Y_{pt})^2}$), visto que as linhas referentes aos resultados exportados não coincidiam com os eixos X e Y.

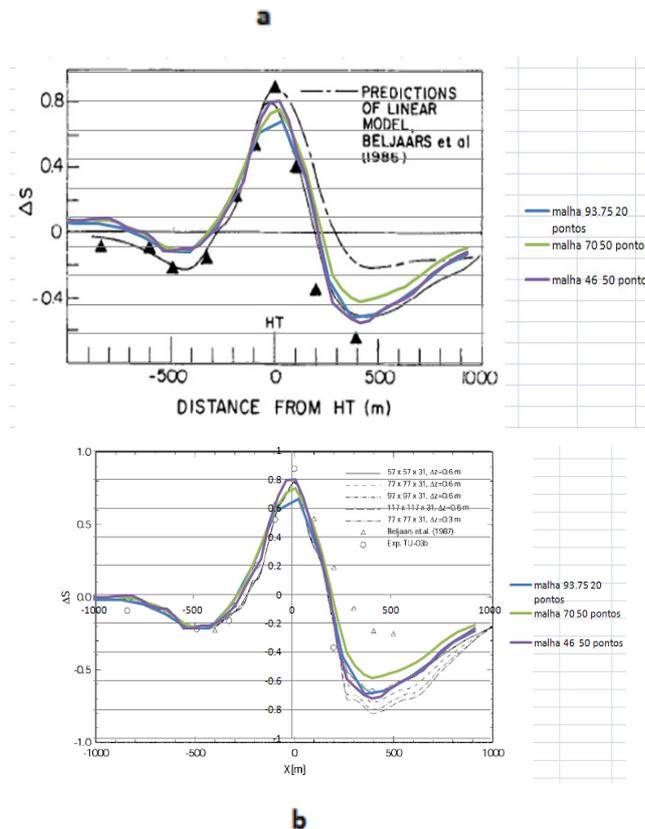


Figura 13-Resultados obtidos ao longo da linha A

a)Raithby b)Castro Palma

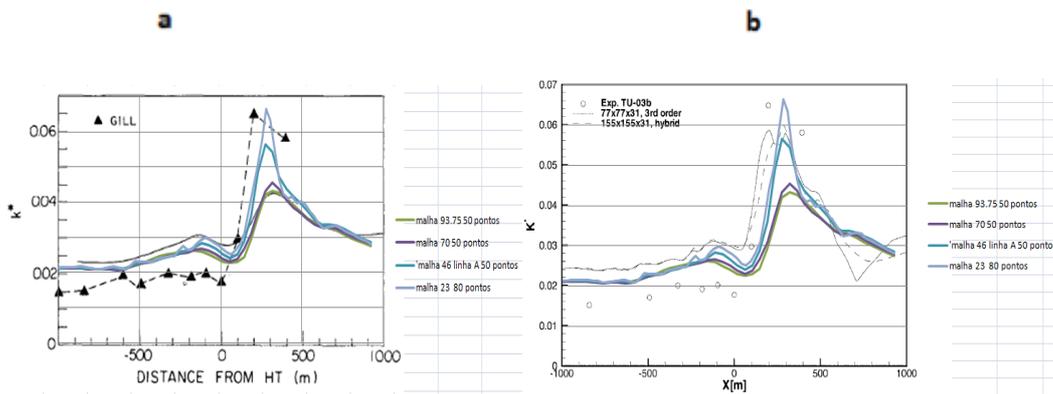


Figura 14-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*

a)Raithby b)Castro Palma

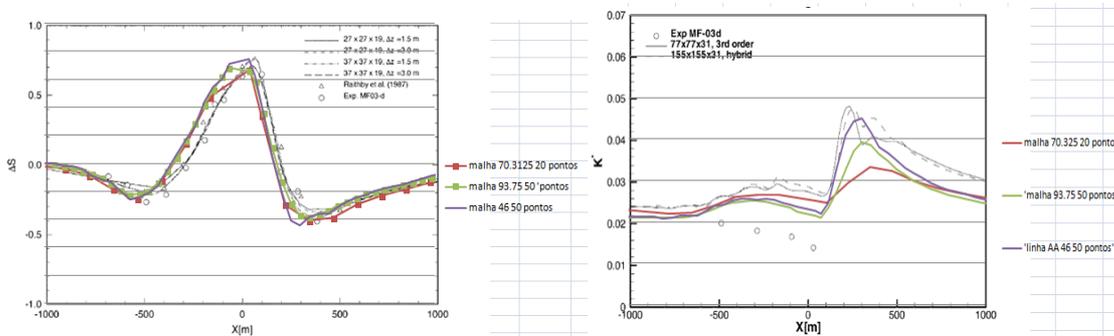


Figura 15-Comparação dos resultados obtidos ao longo da linha AA, com o estudo de Castro Palma

Analisando os resultados obtidos para as linhas A e AA (figuras 13, 14 e 15), pode-se constatar que mais uma vez os resultados, de certa forma, vão ao encontro dos obtidos em estudos anteriormente feitos. Apesar das semelhanças dos resultados obtidos, é possível observar algumas diferenças em alguns gráficos, verificando-se assim os seguintes factos:

- O Parâmetro K^* (energia cinética de turbulência) é mais sensível (em comparação com Δs) à refinação da malha (figuras 14 e 15);
- Algumas das curvas obtidas a partir dos resultados do estudo realizado não apresentam formas tão bem definidas como as que foram obtidas nos estudos anteriores;
- Nos resultados obtidos para a linha AA constata-se que os valores máximo e mínimo de Δs e K^* , respetivamente, não se verificam no ponto $X=0$.

Quanto ao primeiro ponto, uma possível justificação para o surgimento de tais diferenças, prende-se com o facto do fenómeno da turbulência ser algo difícil de modelar e pelas suas propriedades não serem constantes ao longo do escoamento.

Desta forma, pode dizer-se que este tipo de variações seria algo esperado, apesar de, de uma maneira global, os resultados obtidos terem sido bastante satisfatórios.

Para que haja uma boa compreensão destes fenómenos, o programa WindStation disponibiliza-nos uma ferramenta que nos permite visualizar o perfil do escoamento em qualquer zona do domínio, num plano vertical e horizontal. Nas figuras 16,17 e 18 encontram-se representados a distribuição de velocidade e turbulência ao longo do domínio (figura 18) e os perfis de velocidade e turbulência ao longo das linhas A e AA (figuras 16 e 17).

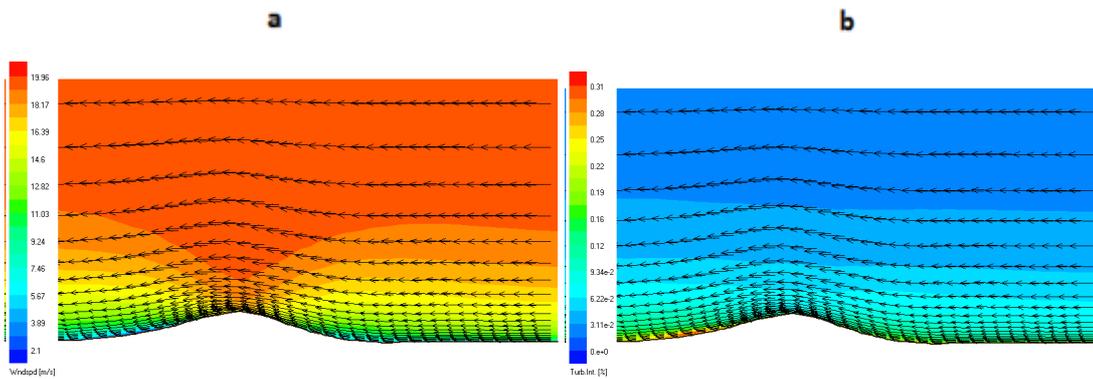


Figura 16-Visualização do escoamento ao longo da linha A

a)Velocidade b)Turbulência

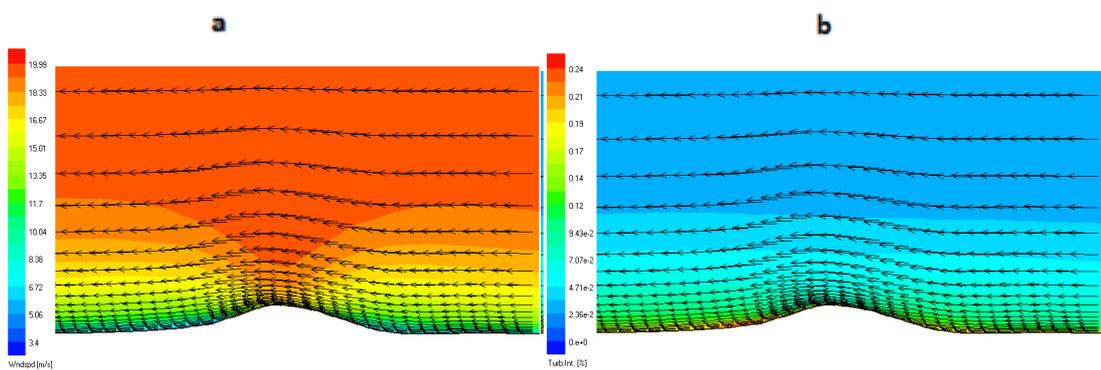


Figura 17-Visualização do escoamento ao longo da linha AA

a)Velocidade b)Turbulência

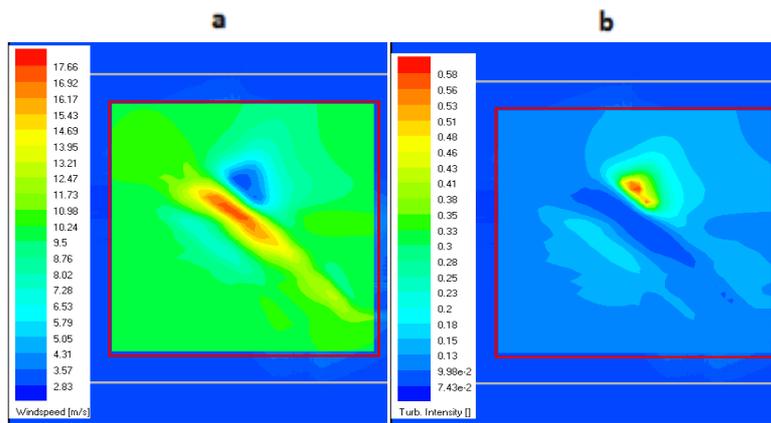


Figura 18-Visualização do escoamento no plano horizontal à altura de 10 metros

a)Velocidade b)Turbulência

Relativamente ao segundo ponto, pode dizer-se que este está diretamente relacionado com o número de pontos que se exporta. Isto é, quanto mais pontos forem exportados, maior será a pormenorização dos resultados obtidos e daí que a curva relativa aos mesmos tomará uma forma cada vez mais definida. Na figura 19 é mostrada a influência do número de pontos exportados na definição das curvas dos resultados.

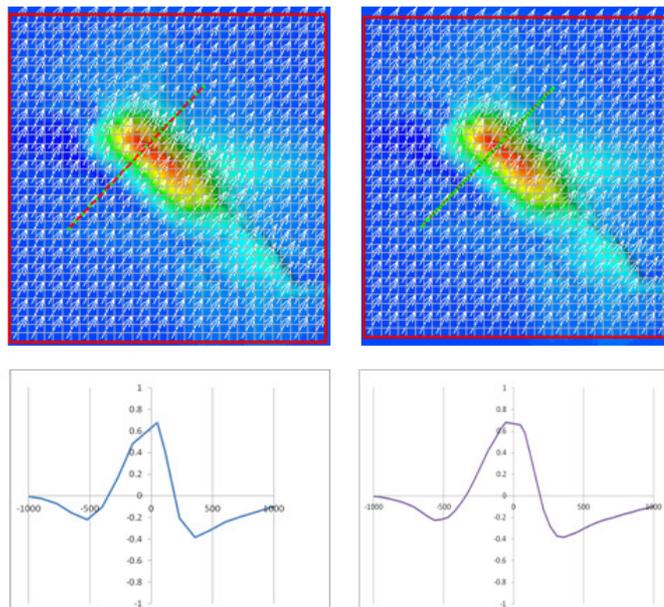


Figura 19-Influência do número de pontos exportados no contorno das curvas

Quanto ao terceiro ponto, pode dizer-se que a razão pela qual os valores máximo e mínimo de Δs e K^* , respetivamente, não se situarem no ponto $X=0$ deve-se ao

facto de não serem conhecidas as coordenadas exatas do ponto **Cp**. Como tal optou-se por fazer uma tentativa, o mais próxima possível desse ponto, resultando assim num ligeiro desvio dos gráficos de Δs e K^* relativos à linha **AA**, conforme se pode analisar na figura 15.

3.2. Estudo da influência dos parâmetros de simulação

3.2.1. Estudo da influência da malha

Após a obtenção dos resultados para os perfis verticais e horizontais decidiu-se estudar qual seria o efeito da malha na obtenção dos resultados obtidos com o programa WindStation.

3.2.1.1. Estudo da influência da malha horizontal

Através da análise das figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15, respetivas aos resultados obtidos, podemos observar que a discretização da malha na horizontal tem grande influência na obtenção dos resultados obtidos para a energia cinética de turbulência. Isto é, como se constatou, a energia cinética de turbulência é um parâmetro mais sensível à refinação da malha, o que fez com que houvesse uma maior oscilação dos resultados que foram obtidos para este parâmetro (figura 14). A partir dos resultados obtidos pode concluir-se que quanto mais refinada for a malha, mais próximos serão os resultados dos valores reais.

3.2.1.2- Estudo da influência da malha vertical

Após o estudo da influência da discretização horizontal da malha, optou-se por estudar a influência da componente vertical da mesma, de maneira a entender qual seria o seu efeito sobre os resultados obtidos. Nas figuras 20 e 21 encontram-se os resultados obtidos para diferentes discretizações na vertical. Os cálculos efetuados centraram-se essencialmente nos perfis verticais da velocidade visto que à partida seriam estes que apresentariam maior destaque.

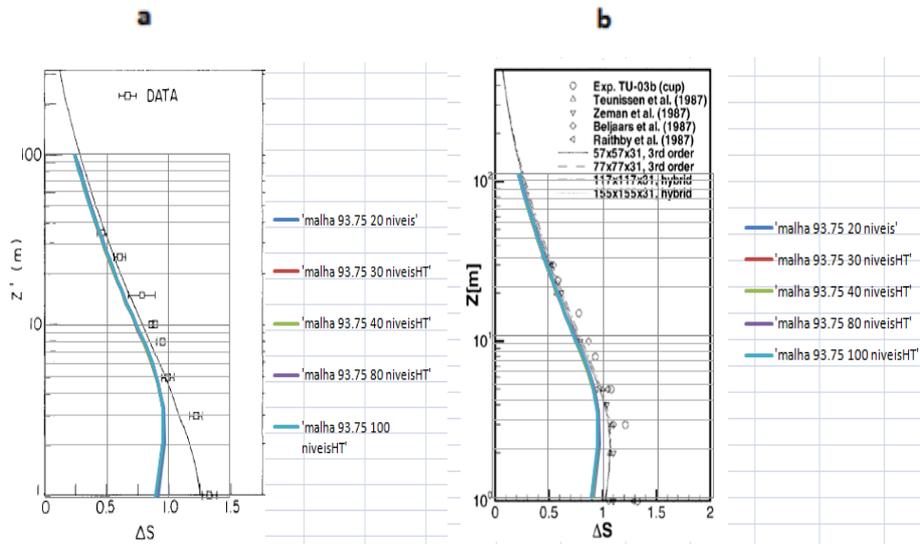


Figura 20-Resultados obtidos no ponto Ht para diferentes níveis verticais

a)Raithby b)Castro Palma

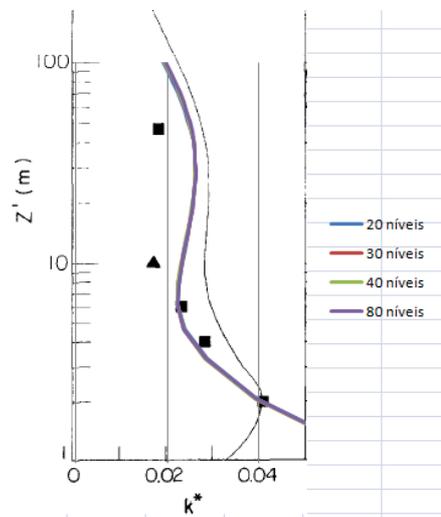


Figura 21-Comparação dos resultados obtidos para K^* com o estudo de Raithby

Através da análise dos gráficos obtidos para diferentes níveis verticais (figuras 20 e 21), nota-se que a malhagem vertical tem pouca influência sobre os valores dos resultados obtidos. Desta forma, conclui-se que a discretização horizontal da malha influencia muito mais a exatidão dos resultados do que a sua discretização vertical.

3.2.2 Estudo da influência da orientação do domínio

Um dos fatores que se optou por estudar também foi a influência da orientação do domínio, com o objetivo de entender qual seria o seu efeito sobre os resultados obtidos. Como tal optou-se por fazer simulações para diversos ângulos (0 a 45 ° - figura 22), usando uma malha horizontal de 46,875m e uma malha vertical com 20 níveis.

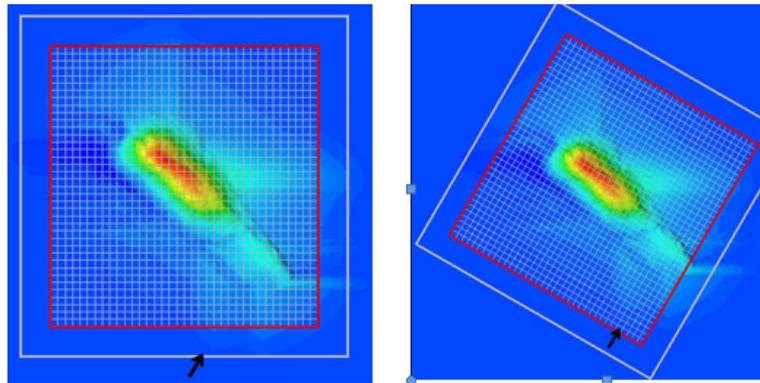


Figura 22-Ilustração de diferentes orientações do domínio (30 e 0 °)

Nas figuras 23, 24, 25 e 26 encontram-se os resultados que foram obtidos para as diferentes orientações.

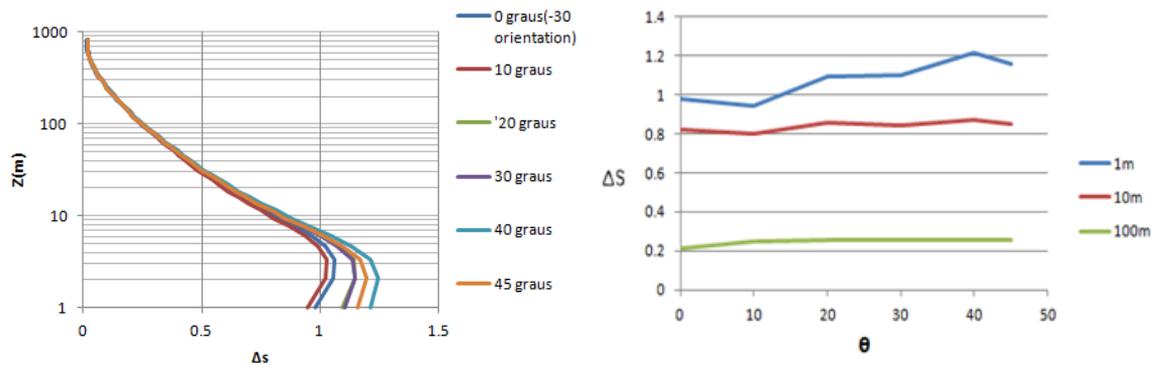


Figura 23-Resultados obtidos para os perfis verticais (ponto Ht)

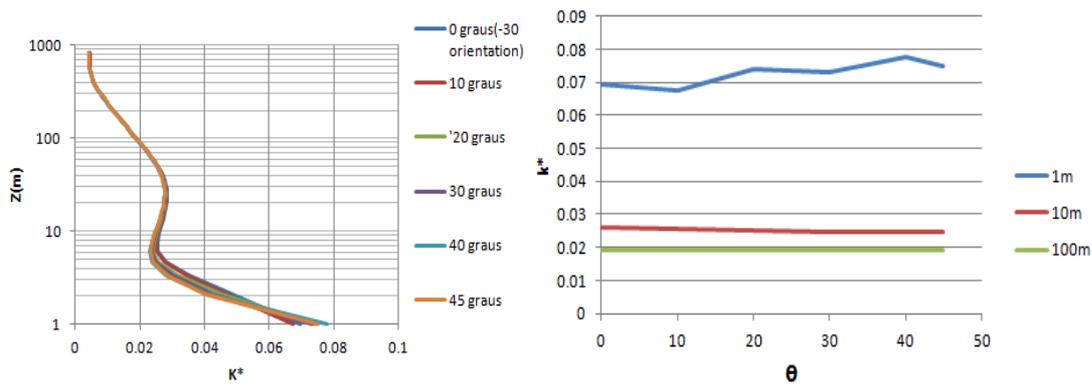


Figura 24-Resultados obtidos para os perfis verticais (ponto Ht) (K^*)

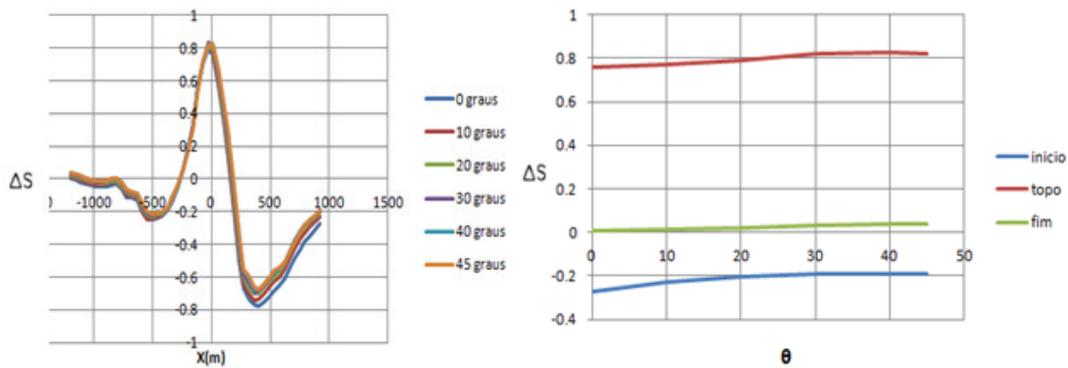


Figura 25-Resultados obtidos ao longo da linha A (ΔS)

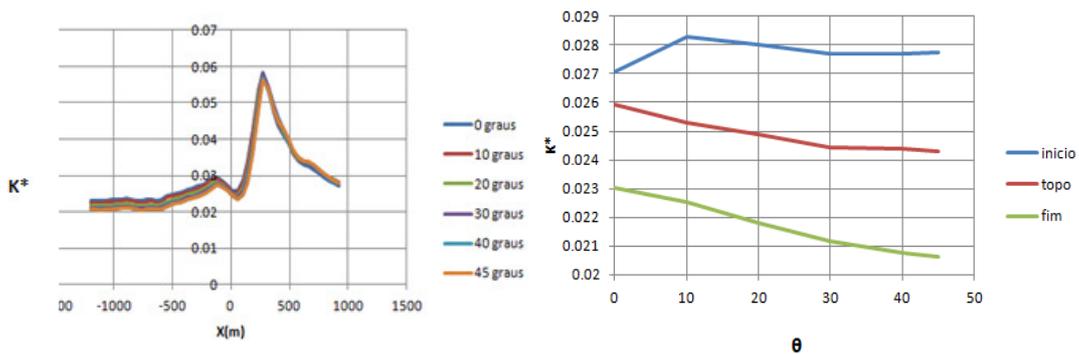


Figura 26-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*

Através da análise dos resultados obtidos para as diferentes orientações, verifica-se que este parâmetro irá ter uma maior influência sobre os perfis verticais do que sobre os perfis horizontais, conforme é visível nas figuras 23 e 24, onde se verifica que as zonas mais próximas da superfície são as mais afetadas. Relativamente aos perfis

horizontais, constata-se que os valores de Δs e K^* estão de acordo com o que era esperado, isto é, os valores de Δs tendem a ser mais elevados no topo da colina, como se pode verificar na figura 13 e as zonas de recirculação tendem a formar-se após a passagem do vento pela colina ($X=0$), situação que é observável na figura 18.

É de notar também que, de uma forma geral, os valores de Δs e K^* (**a 1m**), tendem a aumentar à medida que nos aproximamos do ângulo de 45° e que os valores de K^* (**10 a 100m**) tendem a diminuir. Tal acontecimento pode ser explicado devido ao facto de que, à medida que vai sendo rodado o domínio, as zonas que estão a ser estudadas ficam, de certa forma, mais ou menos expostas ao escoamento. Isto é, para determinados ângulos, o escoamento pode estar sujeito ou não a maiores densidades topográficas a montante da zona em estudo. Tal acontecimento resulta numa maior ou menor exposição das zonas em estudo, fazendo assim com que haja um aumento ou decréscimo da velocidade e turbulência nestas zonas.

3.2.3 Estudo da influência da extensão do domínio

Por último optou-se por estudar a influência da extensão do domínio (figura 27) sobre os resultados obtidos. Nas figuras 28, 29 e 30 encontram-se os resultados que foram obtidos para as diferentes extensões de domínios estudadas.

(Nota: Nas figuras seguintes – 27, 28, 29 e 30 - os resultados relativos à situação inicial encontram-se nos gráficos do lado esquerdo e os relativos à situação em questão nos do lado direito).

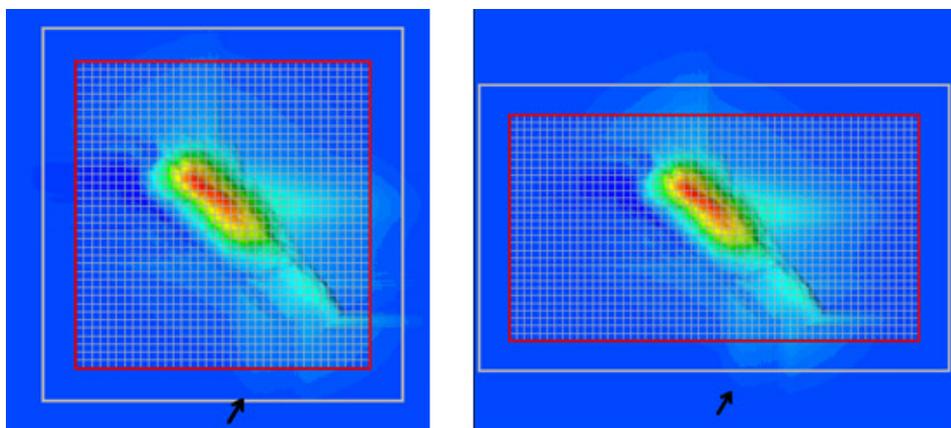


Figura 27-Ilustração das diferentes extensões do domínio estudadas

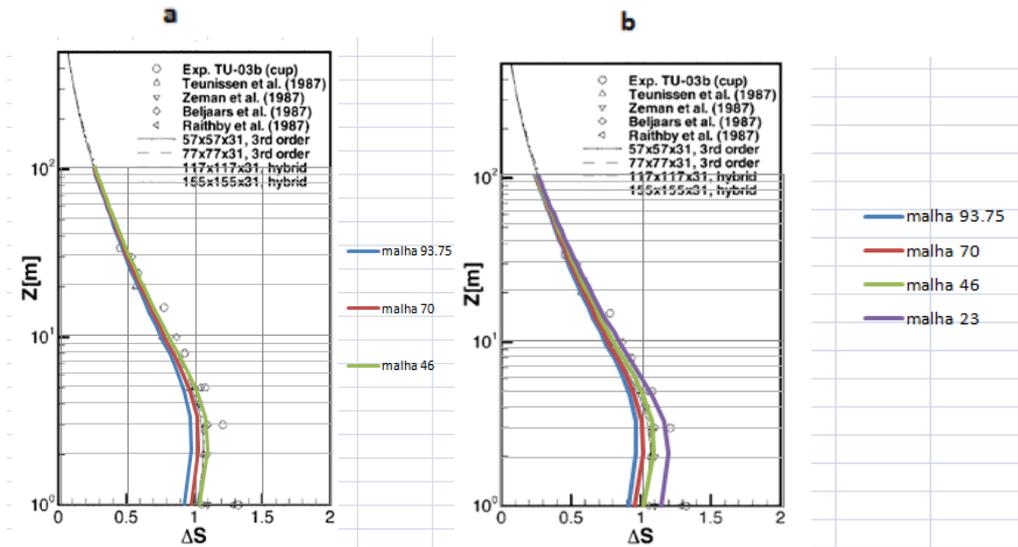


Figura 28-Resultados obtidos no ponto Ht para as diferentes extensões estudadas

a) Situação inicial b) Nova extensão

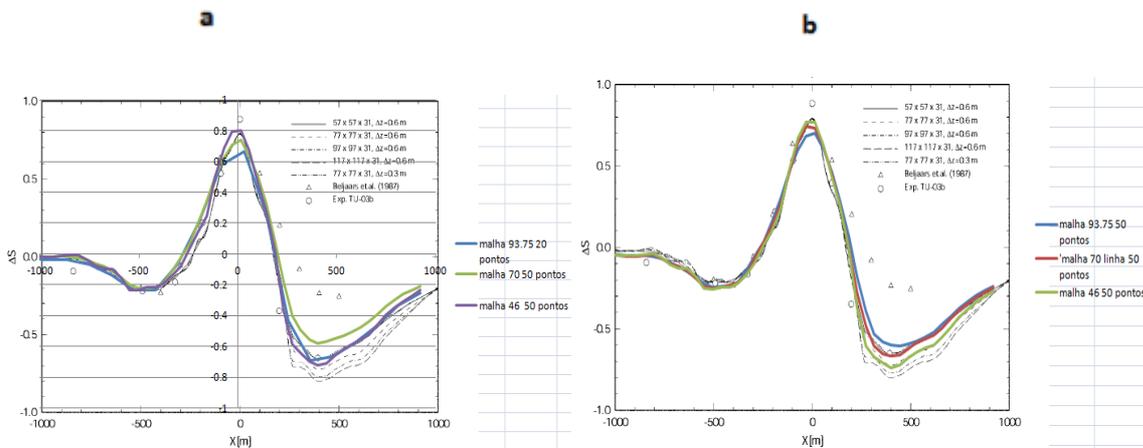


Figura 29-Resultados obtidos ao longo da linha A para as diferentes extensões estudadas

a) Situação inicial b) Nova extensão

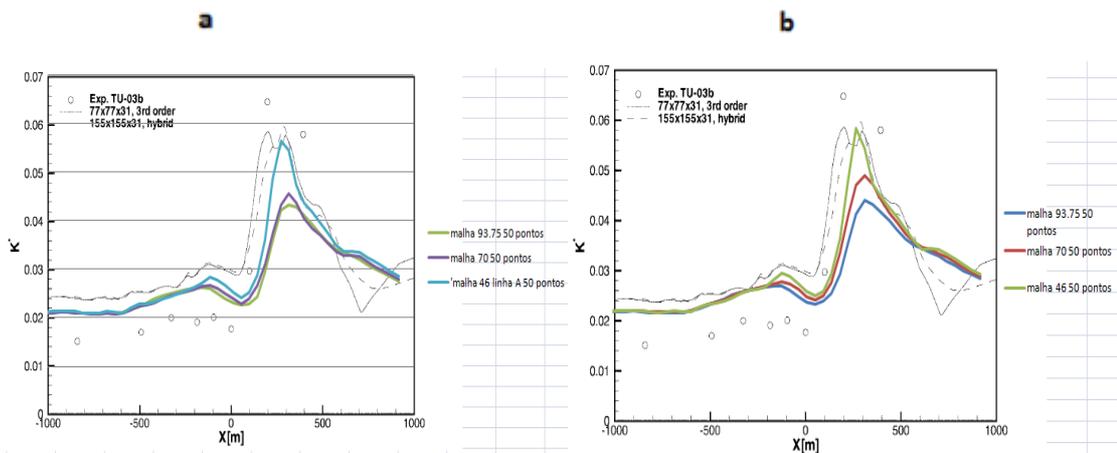


Figura 30-Resultados obtidos ao longo da linha A para K^*

a) Situação inicial b) Nova extensão

Os resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio estudadas mostram que as diferenças resultantes da variação da extensão do domínio para o presente caso são muito pequenas em comparação com a situação inicialmente estudada. Pensa-se que tal “acontecimento” possa ser explicado pela simplicidade topográfica do terreno que não é suficiente para introduzir alterações significativas no comportamento do escoamento.

Em suma, após ter sido realizado o estudo de alguns parâmetros de simulação, tais como a malha, a orientação e extensão do domínio, pode afirmar-se que o parâmetro que mais condicionou a obtenção de resultados foi, sem dúvida, a discretização da malha na horizontal. Tal ocorrência pode ser explicada pelo facto das perturbações resultantes da interação do escoamento com a topografia, ocorrerem essencialmente em zonas próximas ao solo (0-100 metros). Como tal, a refinação da malha horizontal irá ter mais influência na qualidade dos resultados do que a da malha vertical.

É importante mencionar que os resultados obtidos mostram coerência com outros que foram obtidos em outros estudos, como também com os conceitos teóricos. Isto é, como se pode observar, os valores de Δs tendem a ser mais altos no topo da colina ($X=0$) e as zonas de recirculação tendem a formar-se após ocorrer a separação do escoamento.

Relativamente à orientação do domínio, constatou-se que esta irá ter alguma influência nos resultados, mais concretamente nas zonas mais próximas à superfície que, devido ao ângulo que o escoamento faz com o domínio, poderão estar mais ou menos expostas à intensidade do vento.

Quanto à extensão do domínio, constata-se que os resultados que foram alcançados foram praticamente idênticos aos obtidos para a situação inicial. A razão pela qual tal evento ocorreu deve-se essencialmente à simplicidade topográfica do terreno que não introduz alterações significativas na interação com o escoamento incidente.

4. ESTUDO DO CASO SERRA DA LOUSÃ

A Serra da Lousã (figura 31), é uma região montanhosa situada na transição entre os distritos de Coimbra e Leiria. Trata-se de um região que, ao contrário do Caso Askervein, apresenta uma topografia bastante complexa, que é caracterizada por montes com altitudes consideráveis e colinas com grandes discrepâncias.

As razões que levaram à escolha desta região topográfica, foram essencialmente as suas características físicas e complexidade, pondo assim à prova a capacidade de cálculo do programa de simulação numérica usado no presente trabalho.



Figura 31-Serra da Lousã

(Fonte: www.casadaeira.pt)

Os resultados foram obtidos para condições de rugosidade uniforme (0.2m), de atmosfera neutra (idênticas ao caso Askervein) e para ventos dominantes provenientes de Noroeste. As simulações foram feitas para diferentes malhas [400, 280, 200, 160, 120, 80 e 40 (m)] começando das menos refinadas para as mais refinadas.

O principal objetivo deste estudo foi verificar o comportamento do vento em torno de uma topografia complexa, assim como a influência que os parâmetros de simulação usados, à frente apresentados, tiveram sobre os resultados obtidos.

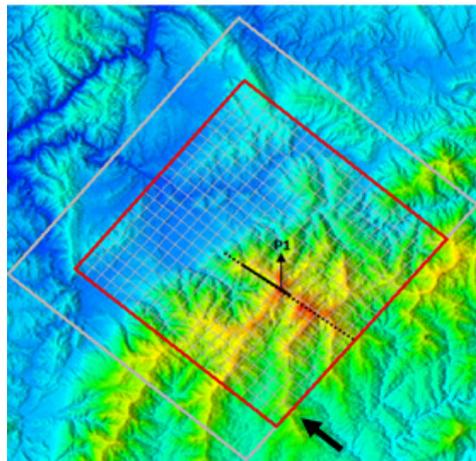


Figura 32-Domínio do caso Serra da Lousã

O ponto **P1** representa um dos pontos mais altos da topografia em estudo e as linhas **B**(\cdots) e **C**(\longrightarrow) representam os locais para onde foram obtidos os resultados relativos aos perfis horizontais (figura 32).

Os resultados foram obtidos para o ponto **P1**, para os perfis verticais, e ao longo das linhas **B** e **C** para os perfis horizontais. Mais uma vez os resultados encontram-se representados em forma gráfica em função dos parâmetros adimensionais Δs e K^* , sendo os resultados referentes ao ponto P1 apresentados em função da altura **Z (m)** e os referentes às linhas **B** e **C**, em função da coordenada **X* (m)**.

4.1. Resultados obtidos no ponto P1

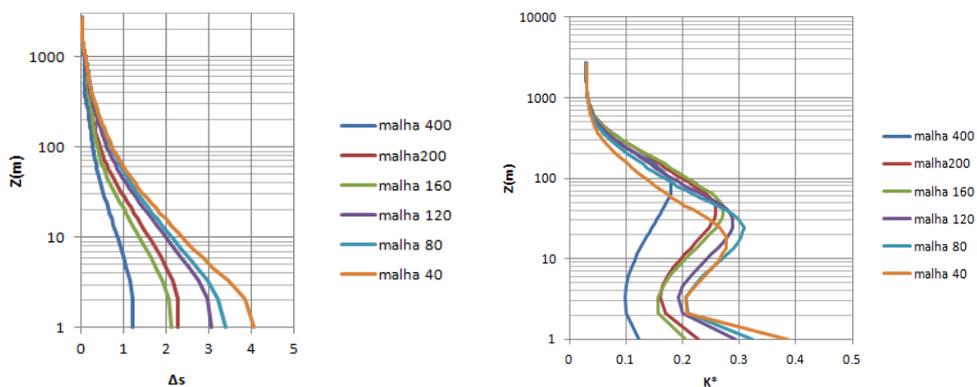


Figura 33-Resultados obtidos para o ponto P1 (Δs e K^*)

Conforme como se pode observar, ao contrário do estudo do primeiro caso (Askervein), em que os resultados apresentavam uma convergência clara, neste caso, esse fenómeno já não se verifica, tornando assim a sua análise mais complexa (figura 33). Como tal decidiu-se organizar a informação que foi obtida de maneira mais simples para que a sua análise pudesse ser mais fácil, expondo os resultados obtidos para Δs e K^* em função da malha. Para os perfis verticais decidiu-se apresentar os resultados de Δs e K^* a 1,10 e 100 metros do solo, visto que estes pontos estarão mais sujeitos à influência da topografia (figura 34).

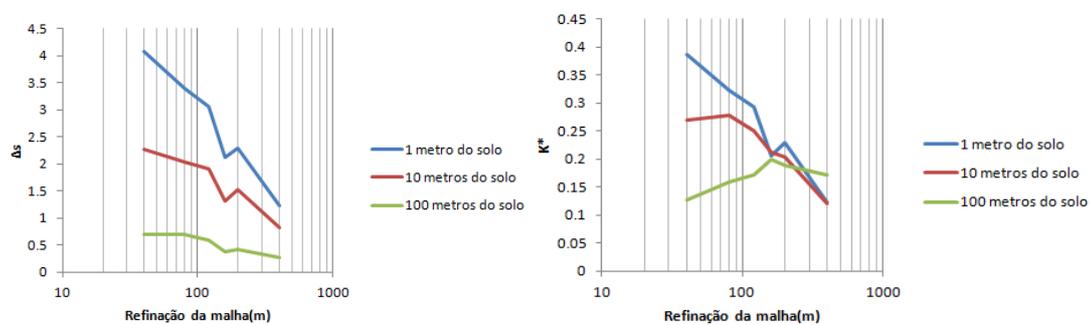


Figura 34-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros (Δs e K^*) em função da malha.

4.2. Resultados obtidos ao longo das linhas B e C

Para análise dos perfis horizontais, optou-se por estudar o comportamento do escoamento ao longo das linhas **B** e **C**, visto estas zonas possuírem grandes irregularidades topográficas e geométricas. Nas figuras 35, 36, 38 e 40 encontram-se os resultados que foram obtidos para a variação do incremento de velocidade e para energia cinética de turbulência ao longo das linhas **B** e **C** em função de X^* (m) e da Malha (m).

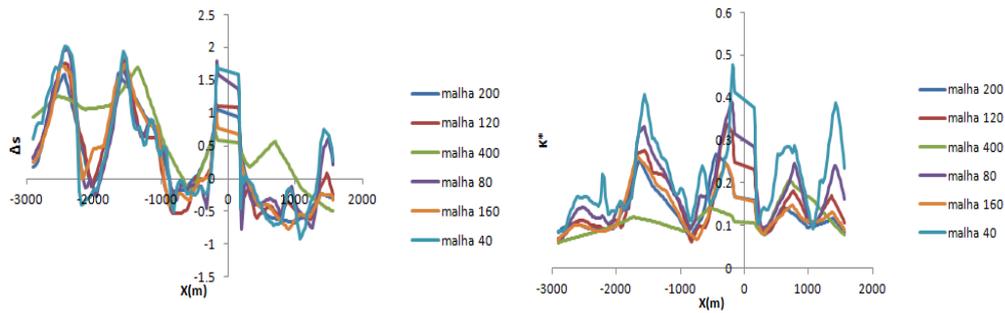


Figura 35-Resultados obtidos ao longo da linha B (Δs e K^*)

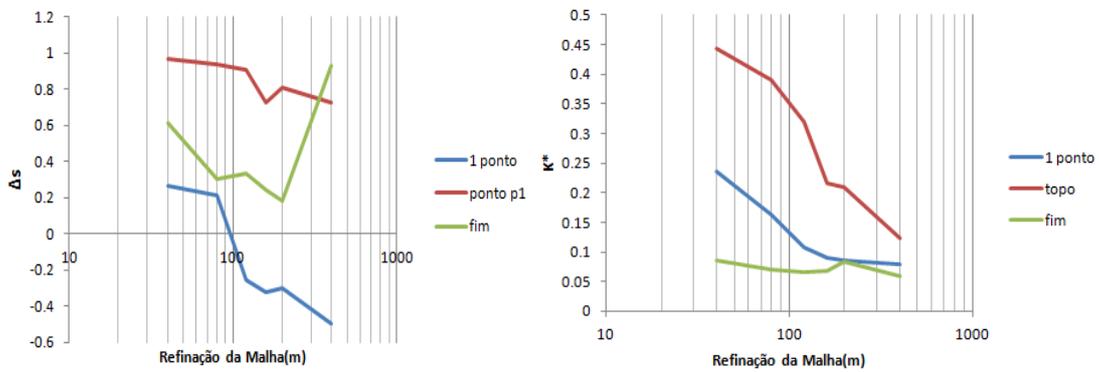


Figura 36-Resultados obtidos ao longo da linha em função da Malha (m)

Nota: A localização dos pontos relativos aos resultados encontra-se esquematizada na figura 37:



Figura 37-Esquemática da representação dos resultados relativos aos pontos P1, 1 e 2

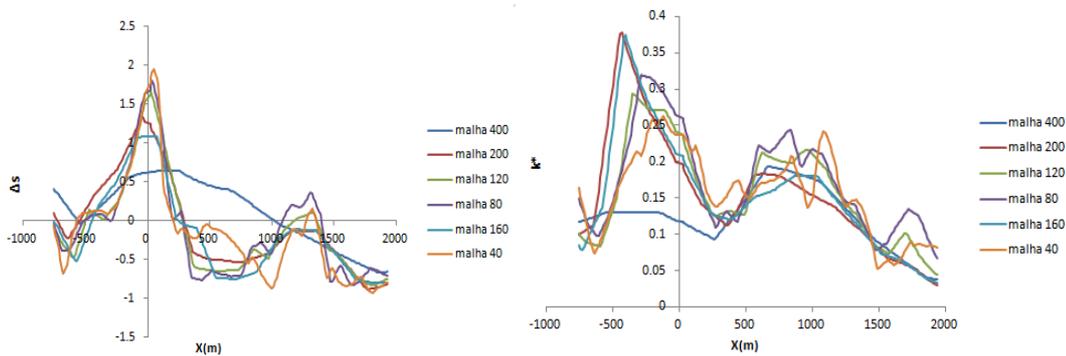


Figura 38-Resultados obtidos ao longo da linha C

Na linha C, os resultados obtidos foram reorganizados da mesma forma que os da linha anterior, passando estes a ser representados em função da malha para três pontos específicos (como se encontra representado nas figuras 39 e 40).

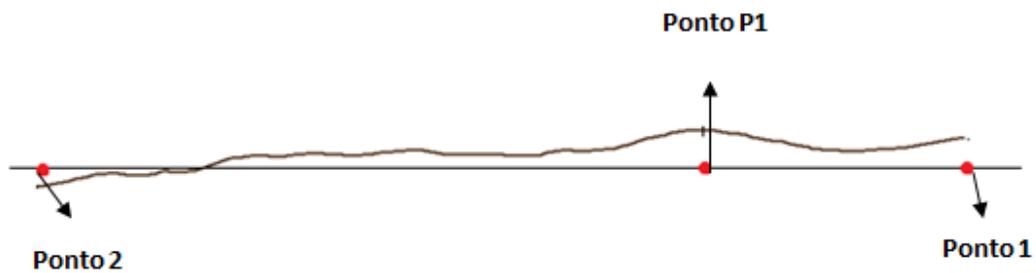


Figura 39-Esquematisação da representação dos resultados relativos aos pontos P1 e 2 para a linha C

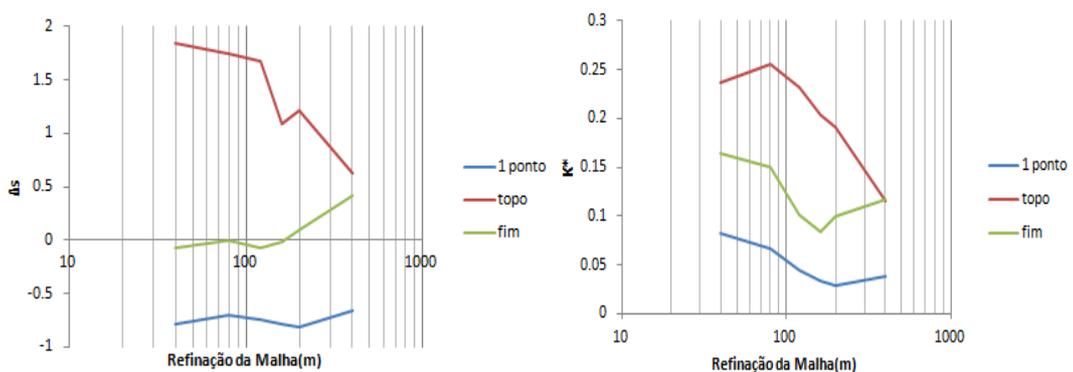


Figura 40-Resultados obtidos ao longo da linha C em função da Malha (m)

Através da análise dos gráficos construídos para o ponto **P1** e para as linhas **B** e **C** pode-se concluir que os resultados que foram obtidos são bastante diferentes aos conseguidos no estudo do Caso Askervein, apesar de tal facto já ser esperado. Os resultados obtidos mostram que, ao contrário do primeiro caso em que se verificava uma convergência clara dos resultados mesmo para malhas pouco refinadas, neste caso em concreto, tal facto já não se verifica. Apesar das simulações terem sido feitas nas mesmas condições de fronteira (rugosidade e tipo de atmosfera) e de se terem variado os mesmos parâmetros de simulação, nota-se claramente o efeito que a topografia exerceu sobre o escoamento incidente. Como consequência, os resultados obtidos para o presente caso tornaram-se, de certa forma, mais difíceis de interpretar.

Pode-se afirmar que a complexidade topográfica influenciou o efeito da malha sobre os resultados obtidos, na medida em que os parâmetros Δs e K^* passaram a ser mais sensíveis à sua refinação. Isto é, como pode constatar-se, em comparação com o caso anterior, nas simulações onde foram usadas malhas menos refinadas, os resultados obtidos são muito diferentes do que aqueles que se obtiveram para as malhas mais refinadas. Daqui conclui-se que os resultados só começaram a coincidir uns com os outros, quando se começaram a usar malhas já com alguma refinação (figura 41).

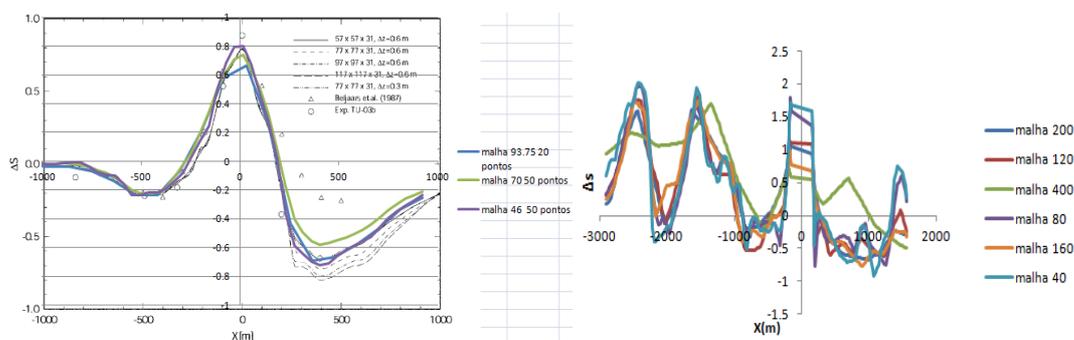


Figura 41-Comparação entre os resultados obtidos para os perfis horizontais dos casos Askervein e Serra da Lousã

Recorrendo à ferramenta de visualização do escoamento, disponibilizada pelo WindStation, obtiveram-se os resultados para as linhas B e C apresentados nas figuras 42, 43 e 44.

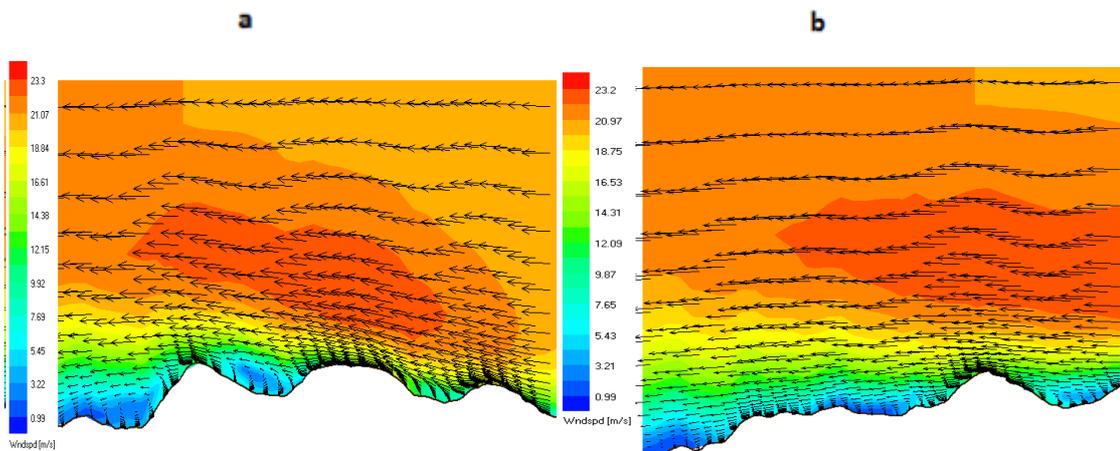


Figura 42-Perfis dos escoamentos ao longo das linhas B e C (Velocidade)

a) Linha B b) Linha C

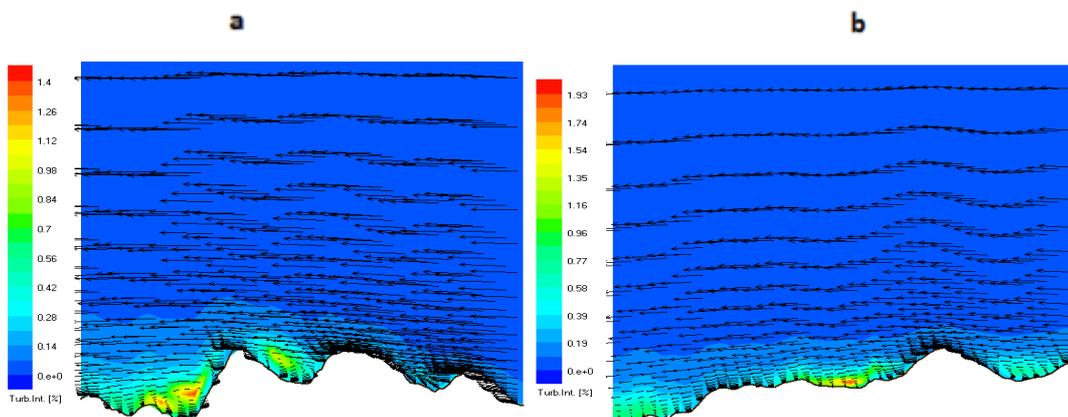


Figura 43-Perfis dos escoamentos ao longo das linhas B e C (Turbulência)

a) Linha B b) Linha C

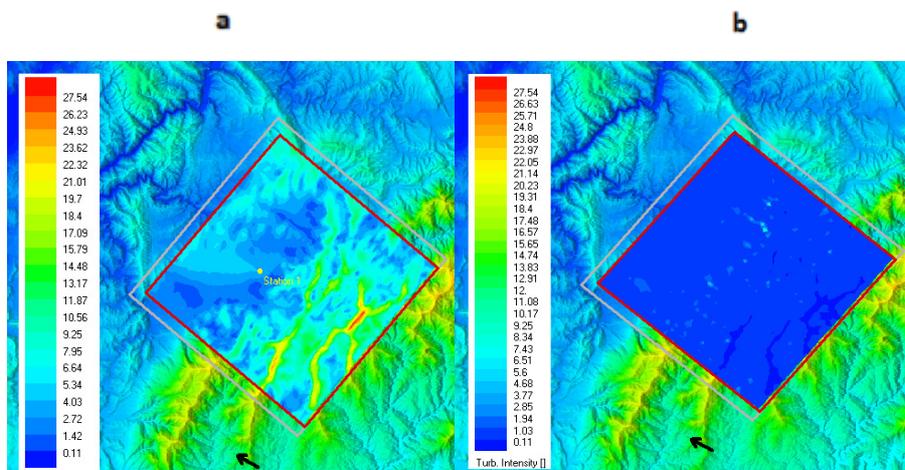


Figura 44-Distribuição da velocidade e turbulência ao longo do domínio a 10m

a) Velocidade b) Turbulência

Através da análise destas figuras (42, 43 e 44), nota-se claramente o efeito que a topografia exerceu sobre o perfil do escoamento incidente, fazendo com que fossem criadas zonas de recirculação ao longo do escoamento. Pensa-se que a razão principal que poderá explicar a dificuldade de obtenção de convergência nos resultados expetáveis tenha essencialmente a ver com o efeito da topografia. Isto é, devido à complexidade topográfica do terreno, o escoamento irá ser submetido a variações muito repentinas de velocidade e a várias zonas de separação. Outra das razões que também poderá ser apontada para tal facto é a modelização do próprio terreno, isto é, como o terreno do presente estudo possui uma estrutura complexa, torna-se imperativo fazer uma boa modelização do mesmo (por parte do software) para obter resultados satisfatórios. É também importante mencionar que o número de pontos que são exportados (relativos aos resultados) influencia a qualidade dos resultados. Isto é, como o presente caso possui uma grande complexidade topográfica, a exportação de um número considerável de pontos irá garantir uma gama de resultados mais pormenorizada das zonas estudadas (Figura 45).

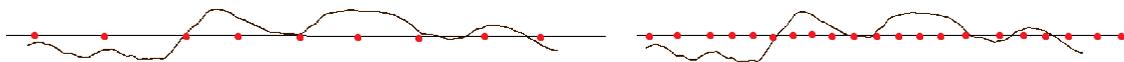


Figura 45-Ilustração da influência do número de pontos exportados (relativos aos resultados)

4.3. Estudo da influência dos parâmetros de simulação

Como foi feito anteriormente no caso Askervein, no presente capítulo decidiu-se estudar, também, qual seria a influência que os parâmetros de simulação iriam ter sobre os resultados obtidos. Optou-se então por estudar qual seria o efeito da malha, da extensão e orientação do domínio sobre esses resultados, expressos nos gráficos das figuras que se seguem.

4.3.1 Estudo da influência da malha

Os resultados obtidos anteriormente, tiveram por base a discretização horizontal da malha no caso em estudo. Com tal, optou-se por estudar qual a influência que a discretização na vertical da malha poderia ter sobre o mesmo estudo.

Na figura 46 apresentam-se os resultados que foram obtidos para diferentes níveis verticais (30, 40, 50, 80 e 100), mantendo sempre a mesma malha horizontal [80 (m)]. Nesta figura podemos observar os resultados obtidos para os diferentes níveis verticais que foram usados para os pontos referentes às alturas de 1,10 e 100 metros.

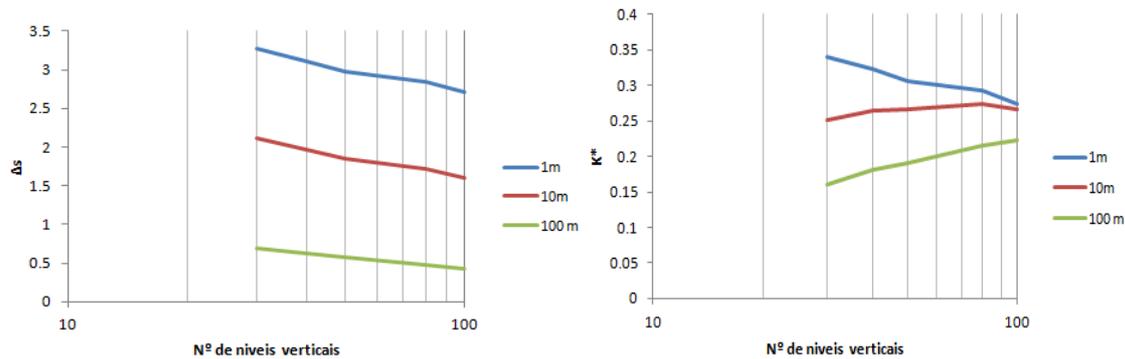


Figura 46-Resultados obtidos referentes à influência da malha vertical (ponto P1)

Os resultados obtidos mostram que, tal como no caso anterior, de um modo geral, a discretização vertical da malha tem pouca influência sobre os mesmos. Embora neste caso em concreto, se note que a influência desta discretização sobre os resultados é maior (em comparação com o caso anterior), a influência deste parâmetro não é crucial na obtenção de bons resultados.

4.3.2 Influência da orientação do domínio

Tal como no primeiro caso, optou-se por estudar a influência da orientação do domínio sobre os resultados. Como tal optou-se por fazer simulações para diversos ângulos (0 a 45 °, figura 47), usando uma malha horizontal de 120 (m) e uma malha vertical com 30 níveis, visto estas malhas terem demonstrado a obtenção de resultados relativamente bons nos casos anteriores. Nas figuras 48, 49, 50 e 51 encontram-se os resultados que foram obtidos para as diferentes orientações.

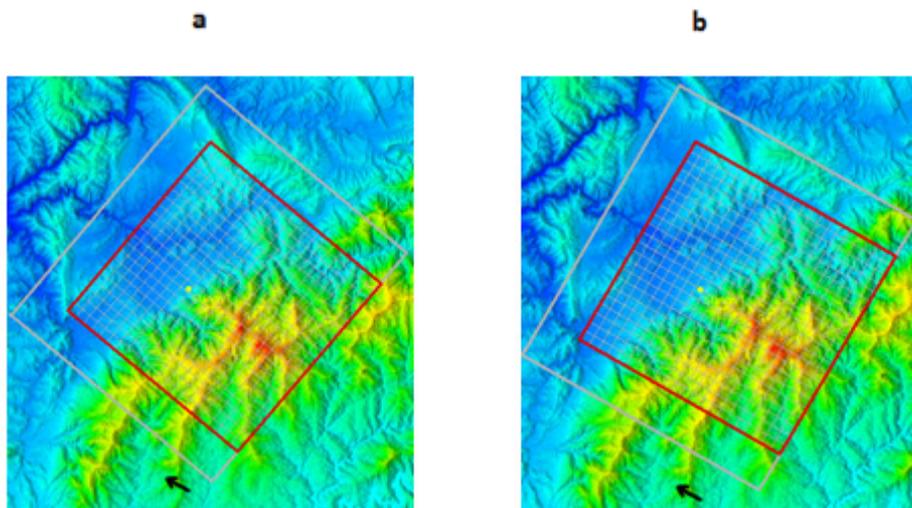


Figura 47-Ilustração de diferentes orientações do domínio (0 e 10 °)

a) 0 ° b) 10 °

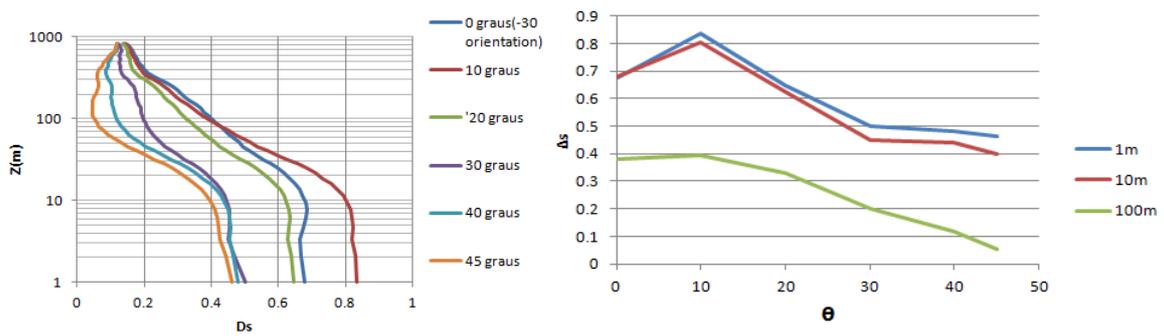


Figura 48-Resultados obtidos para os perfis verticais para as diferentes orientações (Ds)

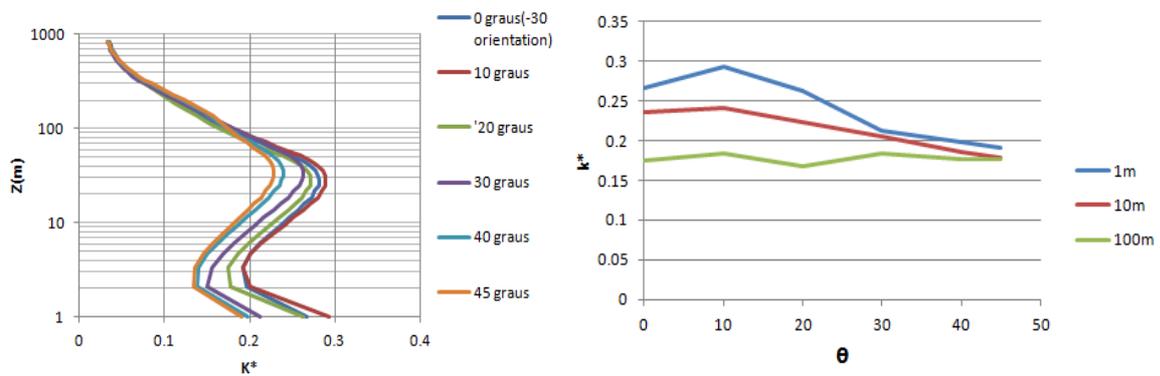


Figura 49-Resultados obtidos para os perfis verticais (K*)

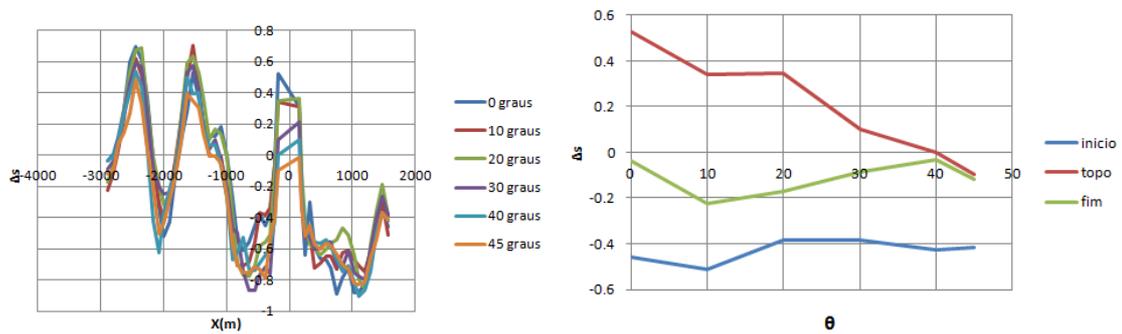


Figura 50-Resultados obtidos ao longo da linha B (Ds)

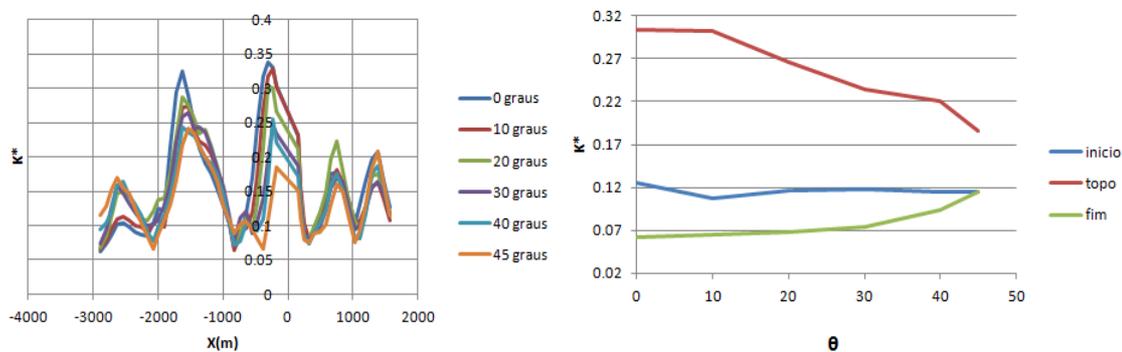


Figura 51-Resultados obtidos ao longo da linha b (K*)

Através da análise dos resultados obtidos para as diferentes orientações, pode constatar-se que as variações resultantes da rotação do domínio são, de um modo geral, mais acentuadas. Ao contrário do sucedido no primeiro caso estudado (Askervein), a rotação do domínio introduziu alterações significativas nos resultados obtidos para os perfis verticais e horizontais. Tal facto já era esperado, visto o presente caso apresentar uma topografia complexa e que daí a influência da orientação do domínio seja mais acentuada, neste caso, por comparação ao anteriormente estudado.

A análise das figuras 48, 49, 50 e 51, permite constatar que no presente caso a orientação do domínio irá influenciar os resultados de uma maneira mais global. Isto é, ao contrário do primeiro caso em que se constatou que este parâmetro iria apenas influenciar as zonas mais próximas da superfície, no presente caso constata-se que a orientação do domínio irá ter um maior impacto dentro da camada limite atmosférica. Pensa-se que tal facto possa dever-se ao efeito que a topografia exerce sobre o escoamento incidente, fazendo com que a sua complexidade obrigue o escoamento a mudanças bruscas de direção

e velocidade, resultado assim em diferenças mais acentuadas em comparação como primeiro caso estudado.

4.3.3 Influência da extensão do domínio

Por fim, decidiu-se estudar também qual seria a influência da extensão do domínio (figura 52) sobre os resultados obtidos. Nas figuras 53, 54, 55, 56 e 57, encontra-se a comparação entre os resultados para o presente estudo e os obtidos inicialmente. As simulações para estes dois casos estudados foram feitas para diferentes malhas horizontais [400, 280, 200, 160, 120, 80 e 40 (m)] e para uma malha vertical de 30 níveis.

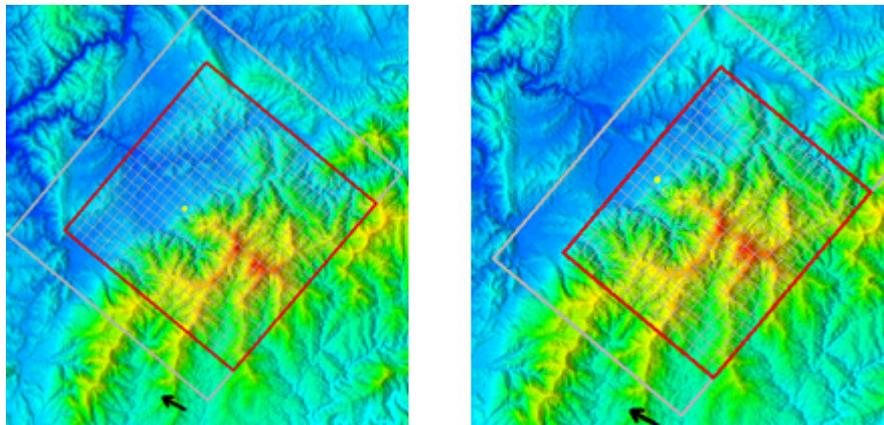


Figura 52-Ilustração das diferentes extensões do domínio estudadas

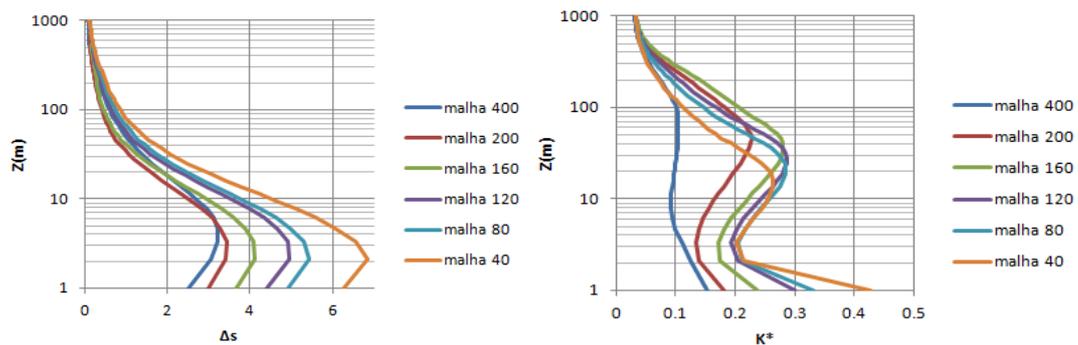


Figura 53-Resultados obtidos para os perfis verticais para o ponto P1

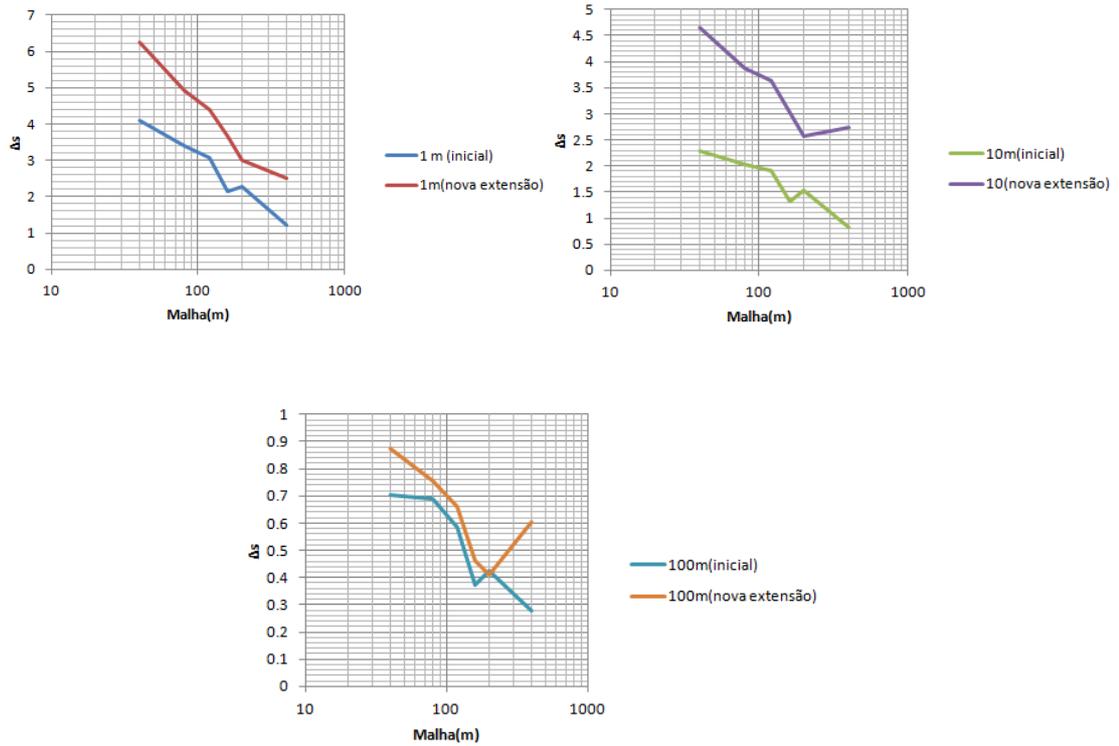


Figura 54-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para Δs (Ponto P1)

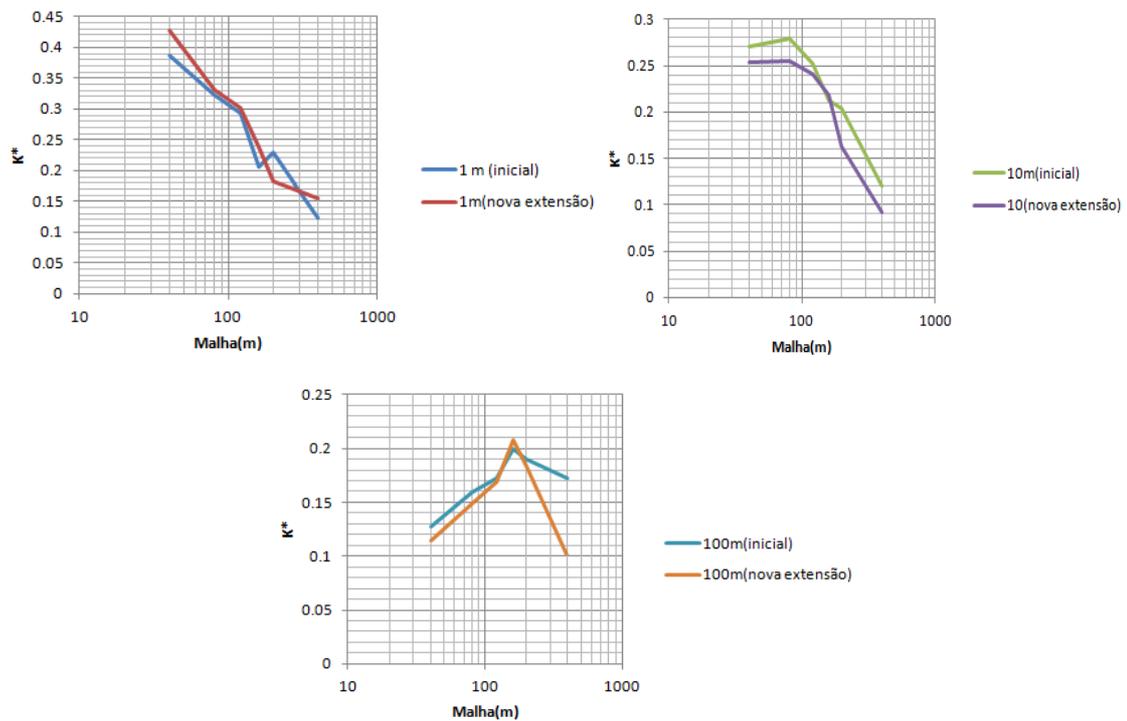


Figura 55-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para a energia cinética de turbulência (K^*) (ponto P1)

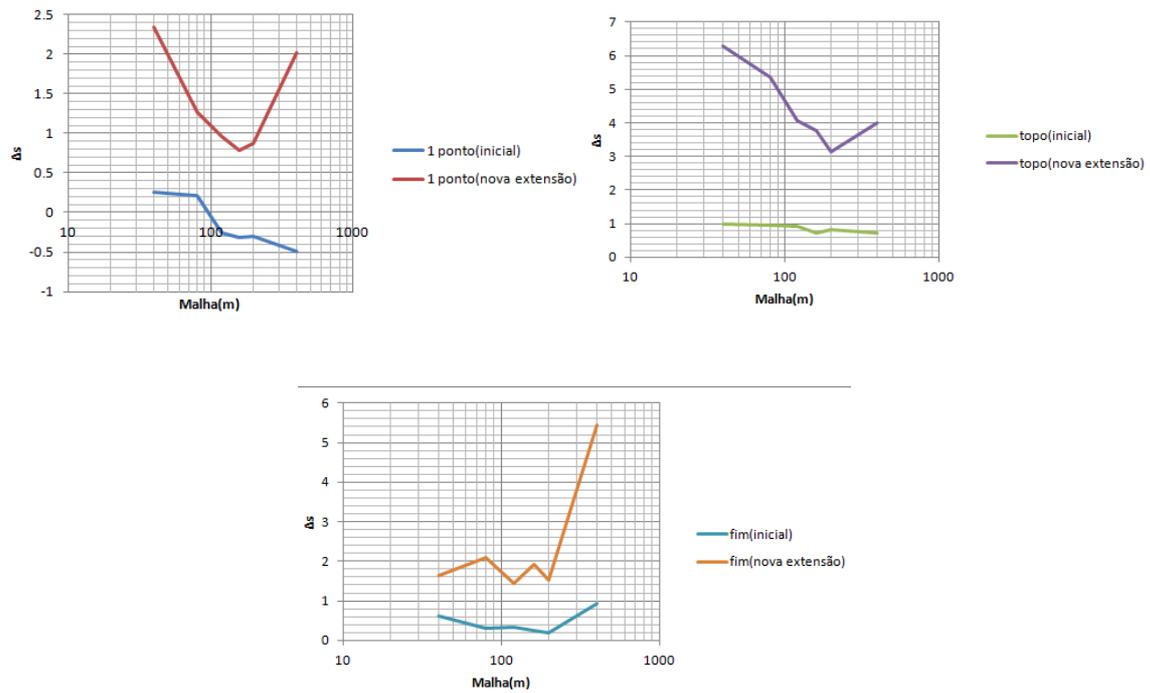


Figura 56-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para o speed up ao longo da

Linha B

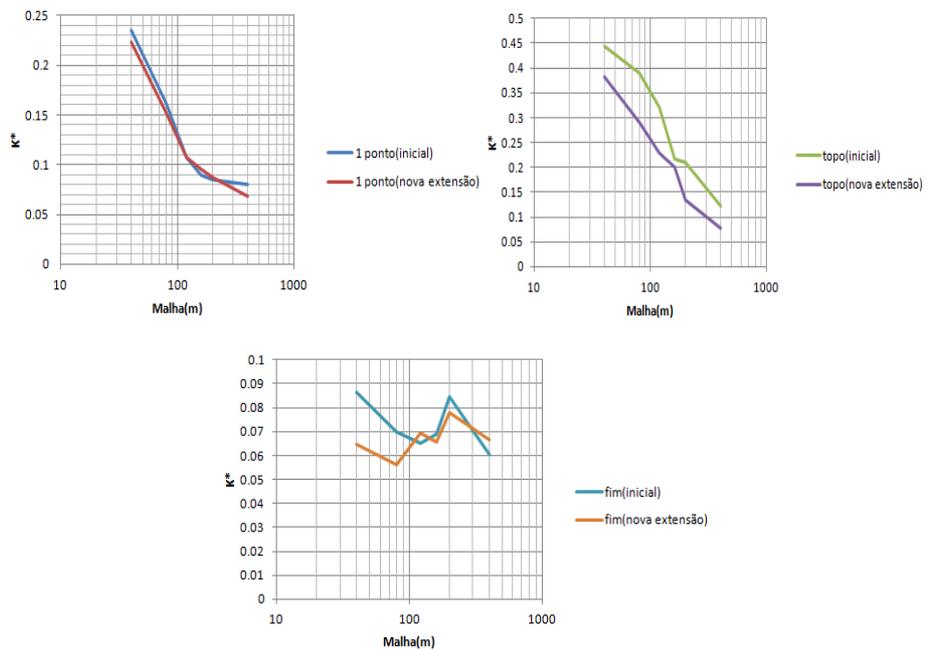


Figura 57-Resultados obtidos para as diferentes extensões do domínio para a energia cinética de turbulência ao longo da linha B

Os gráficos mostram claramente que a extensão do domínio influenciou os resultados obtidos, destacando-se a influência deste parâmetro mais no presente caso. Tal

resultado já era esperado visto que a influência da topografia sobre o escoamento incidente iria fazer-se sentir com maior intensidade e tal facto resultou numa maior influência deste parâmetro.

A análise dos gráficos obtidos permite concluir que, de um modo geral, os resultados obtidos para o *speed up* (Δs) foram mais influenciados do que os que foram obtidos para a energia cinética de turbulência (K^*). Consta-se que as maiores diferenças de resultados encontram-se nos valores obtidos para Δs em função da refinação da malha (figura 56), sendo estas discrepâncias mais acentuadas nos gráficos dos perfis horizontais obtidos para a linha B.

Segundo Sarah J. Wakes *et al.* (2010), trabalhos realizados nesta área têm demonstrado que a partição do domínio permite fazer simulações com malhas mais refinadas em áreas geometricamente mais pequenas, podendo esta técnica ser muito útil no estudo de escoamentos em torno de grandes geometrias tridimensionais. Seguindo esta ideia pode dizer-se que, para a mesma malha, através de uma redução da extensão do domínio é possível obter uma maior relação (malha/domínio). Recorrendo a esta metodologia é possível estudar em pormenor zonas que possuam topografias de natureza mais complexa, de maneira a entender melhor como o escoamento interage com estas e obter resultados mais concretos.

Apesar desta constatação, não se consegue explicar a grande discrepância dos resultados obtidos, mais concretamente para os valores obtidos ao longo da linha B. Isto é, apesar de serem esperadas algumas diferenças nos resultados, não se consegue explicar o facto de terem surgido grandes discrepâncias nos resultados obtidos para Δs ao longo da linha B e que para a energia cinética de turbulência (K^*) tal facto não se tenha verificado.

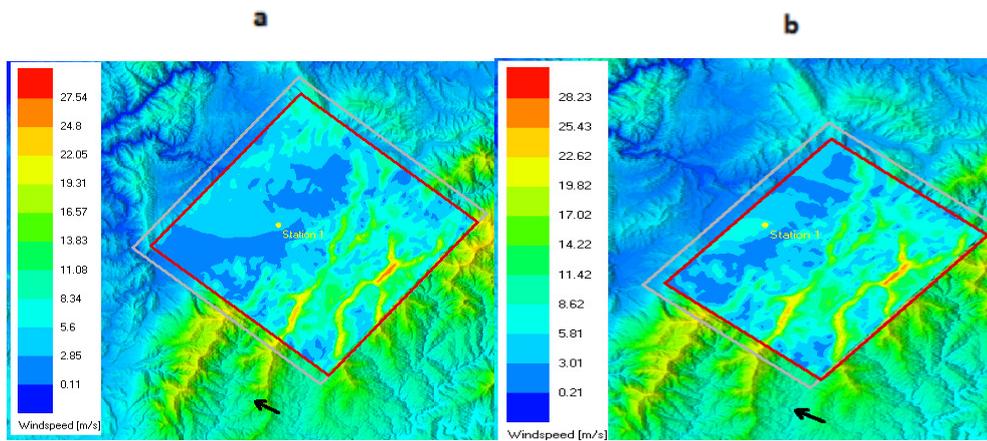


Figura 58-Mapa de velocidades para as situações estudadas

a) Situação inicial b) Nova extensão

5. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

No presente capítulo decidiu-se estudar a influência das condições de fronteira sobre os resultados.

As condições de fronteira estudadas foram a rugosidade do terreno e o tipo da atmosfera da sua envolvente. Os resultados das simulações foram obtidos para a mesma malha horizontal e vertical, (46,875m e 30 níveis) visto que estas malhas demonstraram ter bons resultados no estudo do caso Askervein. Foram obtidos resultados para valores de rugosidade [0.2, 0.3, 0.5, 0.7 e 1 (m)] e para atmosferas do tipo estável, instável e neutra. As simulações foram efetuadas para o caso Askervein, devido ao facto de que a sua simplicidade topográfica ajudaria a obter resultados mais claros quanto às diferenças que seriam introduzidas pela alteração destes parâmetros.

5.1. Estudo da influência da rugosidade do terreno

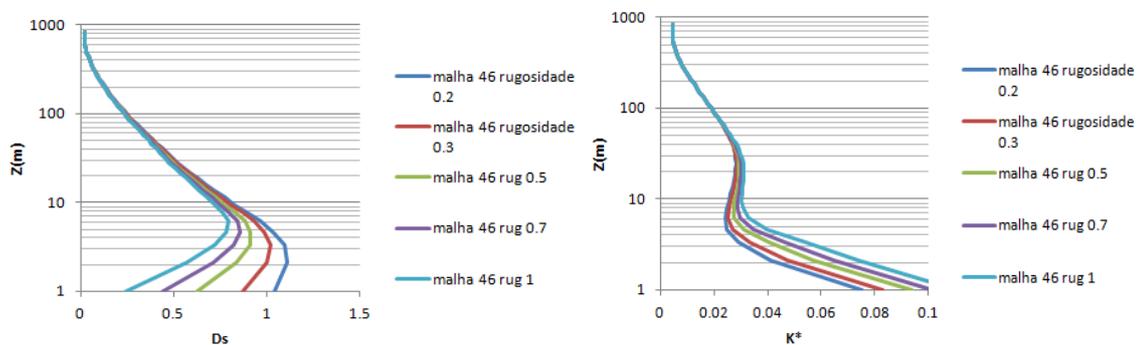


Figura 59-Resultados obtidos nos perfis verticais para diferentes rugosidades (Ht)

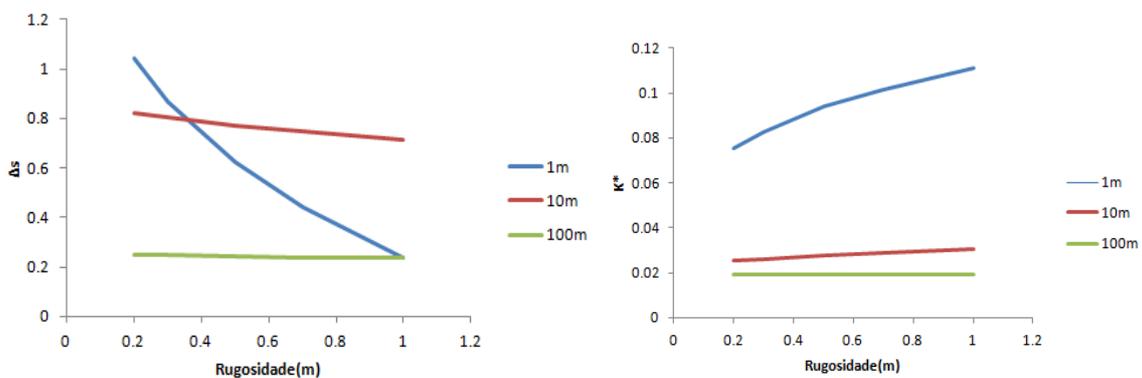


Figura 60-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros em função da rugosidade

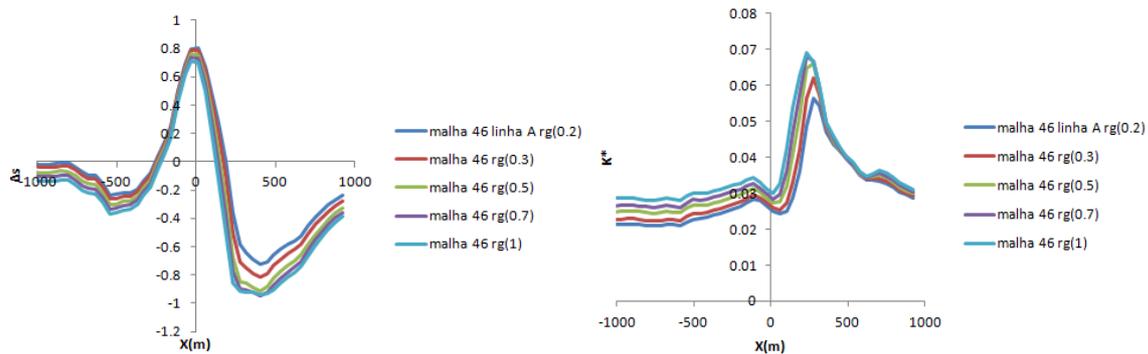


Figura 61-Resultados obtidos ao longo da linha A para as diferentes rugosidades estudadas

Como era esperado, os resultados mostraram que a rugosidade do terreno só influencia os resultados nas zonas mais próximas da superfície. Segundo Teunissen *et al.* (1987) e Taylor *et al.* (1986), a rugosidade do terreno irá ter grande influência nos valores de Δs no topo da colina, fazendo com que haja variações significativas na velocidade neste ponto (figura 61). Através da análise das figuras 59 e 60 é possível constatar que as variações de velocidade e turbulência são mais acentuadas nas zonas mais próximas da superfície. Mais concretamente, através da análise da figura 60, nota-se que as variações para a altura de 1m são mais acentuadas do que para as restantes. Tal facto permite-nos concluir que o fator rugosidade irá atuar como um “retardante” nas zonas mais próximas à superfície, fazendo com que a velocidade nestas zonas seja mais baixa e introduzindo ao mesmo tempo uma maior taxa de turbulência.

5.2. Estudo da influência do tipo de atmosfera

Nas figuras 62, 63, 64 e 65 encontram-se os resultados que foram obtidos para os perfis verticais e horizontais relativos aos diferentes tipos de atmosferas. As simulações foram feitas para atmosferas do tipo estável ($-0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$), neutra ($-0.009^{\circ}\text{C}/\text{m}$) e instável ($0.01^{\circ}\text{C}/\text{m}$).

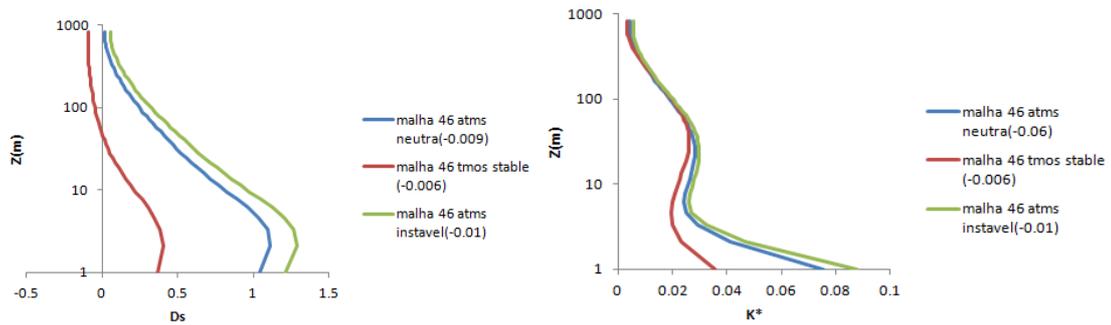


Figura 62-Resultados obtidos para diferentes tipos atmosfera no ponto Ht

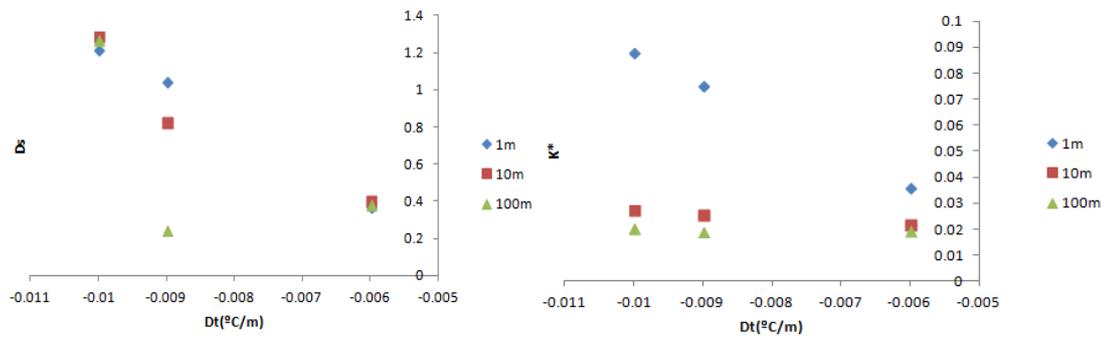


Figura 63-Resultados obtidos a 1,10 e 100 metros em função do gradiente de temperatura

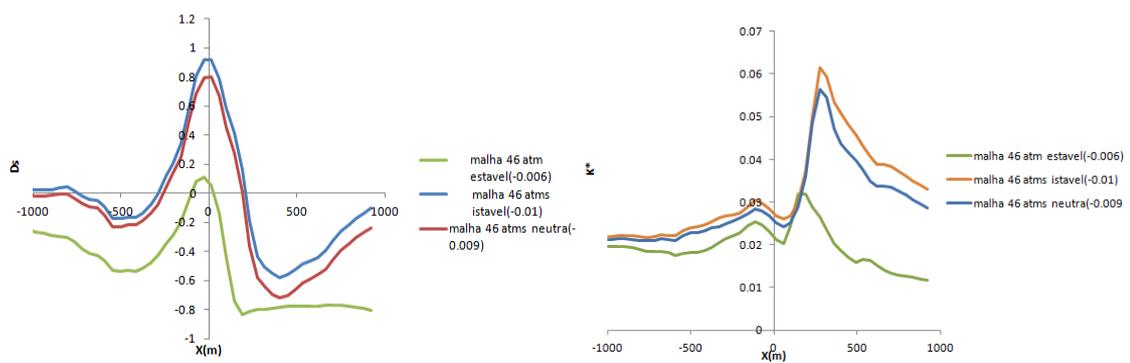


Figura 64-Resultados obtidos ao longo da linha A para os diferentes tipos de atmosferas

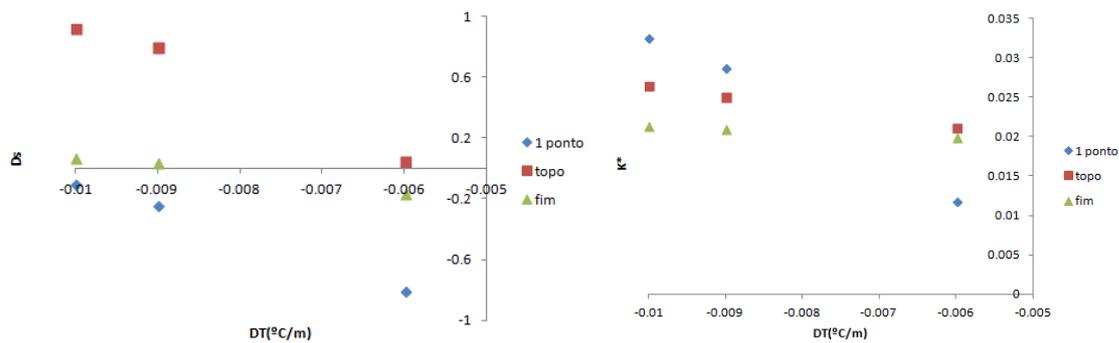


Figura 65-Resultados obtidos para os pontos 1,P1 e 2 para as diferentes atmosferas estudadas

Os resultados obtidos mostram claramente que o tipo de atmosfera influencia a maneira como o escoamento interage com a superfície. Apesar de se ter usado a mesma malha e rugosidade, em todo o domínio, o tipo de atmosfera influenciou claramente o comportamento do escoamento em torno da topografia.

Através da análise dos gráficos das figuras anteriores (62, 63, 64 e 65) é possível constatar que os resultados obtidos para uma atmosfera do tipo estável apresentam valores mais baixos em comparação com os obtidos para uma atmosfera neutra ou instável (figura 65). Tal facto pode ser explicado recorrendo à definição de estabilidade ou instabilidade de atmosfera.

No caso dos resultados obtidos para uma atmosfera estável, as variações inversas de temperatura que caracterizam este tipo de atmosfera, irão resultar num amortecimento da turbulência. Tal facto faz com que haja um decréscimo geral nos valores de Δs e k^* , fazendo assim com que o escoamento, de certa forma, seja obrigado a contornar a topografia de uma maneira mais suave.

Relativamente aos resultados obtidos para uma atmosfera do tipo instável, ocorre precisamente o contrário ao caso da atmosfera estável. Como neste tipo de atmosfera os fenómenos térmicos contribuem fortemente para o aumento da turbulência (figura 67), facto que irá resultar num aumento geral dos valores Δs e k^* (figura 62), fazendo com que sejam introduzidas menos “barreiras” e que o escoamento consiga contornar a topografia com mais facilidade.

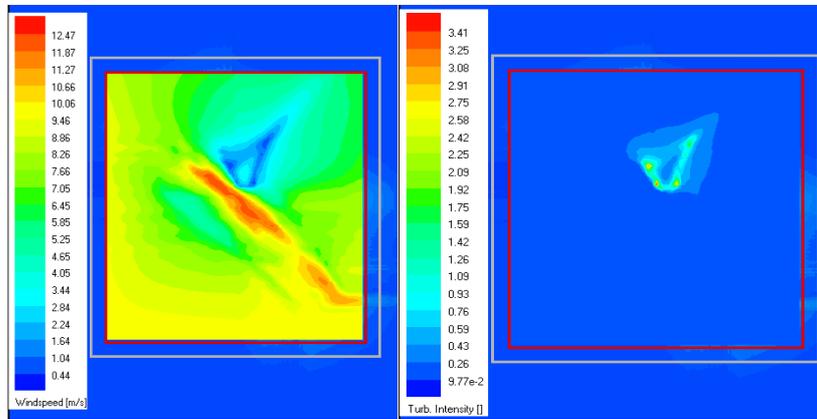


Figura 66-Mapa de distribuição da velocidade e turbulência para uma atmosfera estável

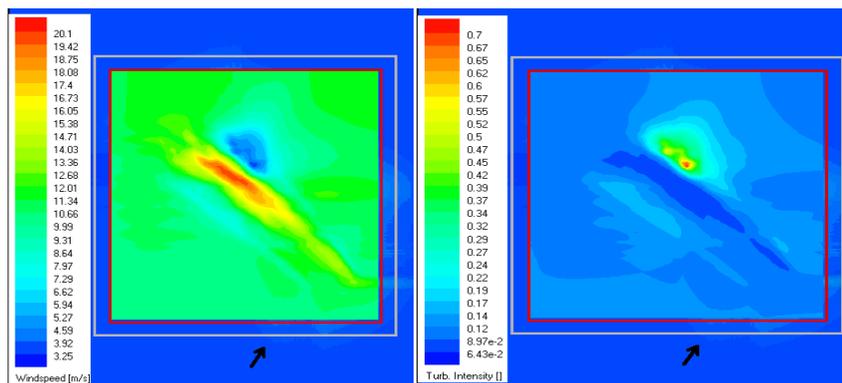


Figura 67- Mapa de distribuição de velocidade e turbulência para uma atmosfera instável

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar a interação do vento com topografias de natureza complexa, assim como analisar a influência que determinados parâmetros de simulação tiveram sobre os resultados obtidos.

Relativamente ao estudo do caso Askervein, pode dizer-se que a validação dos resultados obtidos com o programa WindStation foi bem-sucedida, na medida em que estes foram muito próximos aos que já haviam sido obtidos em outros estudos, anteriormente feitos sobre o mesmo caso.

Quanto ao estudo da influência de alguns parâmetros de simulação (malha, extensão e orientação do domínio), constatou-se que, para este caso, tais parâmetros tiveram pouca influência sobre os resultados. Pensa-se que tal acontecimento esteja diretamente relacionado com a simplicidade topográfica que caracteriza o caso Askervein que, não introduz alterações significativas na interação com o escoamento incidente. Daí poder dizer-se que para estudos de casos que apresentem topografias de natureza simples é possível obter resultados minimamente fiáveis, sem ter de recorrer ao uso de malhas de cálculo muito refinadas.

Quanto ao estudo do caso Serra da Lousã, os resultados obtidos mostram que a previsão do vento em torno de topografias de natureza complexa é algo que continua a ser um desafio nos dias de hoje. Pode dizer-se que, ao contrário do caso Askervein, a obtenção de resultados fiáveis foi algo mais difícil de ser alcançado, na medida em que foi necessário recorrer a malhas de cálculo com grandes refinações. Constatou-se que os parâmetros de simulação estudados (malha, orientação e extensão do domínio), introduziram diferenças significativas nos resultados obtidos, sendo algumas destas difíceis de interpretar. Como tal, pode-se afirmar que, de uma maneira geral, os parâmetros de simulação irão ter uma influência mais globalizada nos resultados obtidos para estudos de casos que possuam topografias de natureza complexa.

Concluiu-se também que as condições de fronteira estudadas (rugosidade e tipo de atmosfera), podem introduzir alterações significativas no comportamento do escoamento incidente. Isto é, terrenos com rugosidades relativamente elevadas introduzem

perturbações no escoamento, originando um decréscimo geral da velocidade do vento e um aumento da taxa de turbulência nas zonas mais próximas do solo.

Quanto ao tipo de atmosfera em que se insere o domínio em estudo, constatou-se que para uma atmosfera do tipo estável o escoamento tende a contornar a topografia com menor velocidade e a gerar uma menor taxa de turbulência. Ao contrário, perante uma situação de atmosfera instável, constatou-se que o escoamento tende a contornar a topografia com maior velocidade e a gerar uma maior taxa de turbulência ao interagir com a topografia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D.Anderson, J. J. (1991). *Fundamentals of Aerodynamics* (2ª Ed). Nova Iorque: Mc Graw-Hill Editora.
- Oliveira, L. A. & Gameiro Lopes, A. (2010). *Mecânica dos Fluidos* (3ª Ed). Lisboa: Lidel eDIT Editora.
- Palma, J. M. L. M.; & Silva Lopes; A. (2002). Simulation of the Askervein Flow. part 1: Reynolds averaged Navier-Stokes equations($\kappa-\varepsilon$ Turbulence model). In *Boudary-Layer Meteorology*, volume 107, 3ª edição, (p. 501).
- Raithby, G.D.; Stubley, G.D.; & Talyor, P .A. (1987). The Askervein Hill Project: A finite control volume prediction of three-dimensional flows over the hill. In *Boudary-Layer Meteorology*, volume 30, 3ª edição, (pp.247-267).
- Taylor, P.A. & Teunissen, H. W. (1986). The Askervein Project:overview and background data scales. In *Boudary-Layer Meteorology*, volume 39, 1ª e 2ª edição, (pp.15-39).
- Teunissen, H.W; Shokr, M.E.; Bowen, A.J; Wood, C.J;. & Green, D.W.R (1986). The Askervein Project:wind-tunnel. Simulations at three length scales. In *Boudary-Layer Meteorology*, volume 40, 1ª e 2ª edição, (p.129).
- Wakes, S. J.; Tanja, M. K.; Dickinson, M. J. & Hilton, J. (2009). Numerical modelling of wind flow over a complex topography. In *Environmental Modelling &Software*, volume 25, 2ª edição (pp.237-247).

