



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Definição da tensão de atrito superficial crítica em locais situados no rasto de zonas de recirculação

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

Autor

João Francisco Soares Mendes

Orientador

Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira

Júri

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

Vogais Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2013

O sonho comanda a vida
António Gedeão, em Pedra Filosofal.

À minha irmã e aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração, apoio e suporte que algumas pessoas, directa ou indirectamente, me prestaram.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira por me ter proposto este tema e por ter estado sempre disponível para o esclarecimento de qualquer dúvida e por ter feito sugestões que contribuíram, e muito, para a melhoria da qualidade deste trabalho.

Queria também destacar outros Professores dos quais tive a oportunidade de ser aluno: Professor Jorge André, Professora Cristina Louro, Professor Ricardo Mendes, Professor Altino Loureiro, Professor Francisco Lamas, Professora Ana Amaro, Professor José Costa, Professora Marta Oliveira e Professor Amílcar Ramalho. A todos eles um sincero obrigado.

Uma referência especial à Raquel Faria pela companhia nas tardes de trabalho no Laboratório.

De períodos anteriores à Universidade gostaria de agradecer à Professora Adelaide por todos os puxões de orelhas que me tornaram menos distraído e ao Professor Rato pela paixão com que dava as aulas.

À Inês por ter tido sempre uma palavra para me confortar quando as coisas corriam menos bem.

Por fim agradecer a dois outros Professores, ao meu Pai e à minha Mãe, por me terem ensinado o que não se aprende na Escola e por me terem matriculado nessa cadeira de contínua aprendizagem que é a Vida.

Uma referência muito especial à minha irmã, por ser exactamente isso.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo numérico sobre colinas bidimensionais de perfil sinusoidal recorrendo-se ao programa *CFX Ansys* versão 11.0. São estudadas duas configurações: colina isolada e colinas dispostas em *tandem*.

Avalia-se, numa primeira fase, a influência do modelo de turbulência nos resultados para uma velocidade do escoamento não perturbado de 8.3 m/s. No segundo ponto estuda-se a distribuição, ao longo do tempo, da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica para os perfis médios da colina isolada quando sujeita a uma velocidade do escoamento não perturbado de 9.1 m/s. Sabe-se que se esta relação for superior à unidade ocorre erosão. Finalmente, realizam-se simulações em regime transiente de modo a avaliar a capacidade do programa em modelar fenómenos dependentes do tempo.

Os resultados obtidos mostram que a distribuição da velocidade de atrito depende do modelo de turbulência empregue. Conclui-se, relativamente ao segundo ponto, que deverá ocorrer erosão para todos os instantes de tempo estudados. Nas simulações em regime transiente constata-se que o intervalo de tempo, a velocidade do escoamento não perturbado e a configuração da colina influenciam a distribuição da velocidade de atrito. Assim, todos estes parâmetros deverão ser tidos em conta aquando da definição de uma simulação deste tipo.

Palavras-chave: Erosão, Simulação numérica, Colina, Velocidade de atrito, Separação, Recolamento.

Abstract

This work presents a numerical study, performed with the software CFX Ansys, about the wind flow and erosion conditions around bidimensional hills with a sinusoidal shape. The hills are studied in two configurations: isolated and in *tandem*.

It is intended, in a first stage, to analyze the role of turbulence models in the results obtained, using an undisturbed velocity of 8.3 m/s. In the second stage, the distribution, over time, of the relation between shear velocity and critical shear velocity for the mean profiles of the isolated hill considering an undisturbed velocity of 9.1 m/s, as in the experiments, are studied. It's known that if this relation exceeds one, erosion occurs. Finally simulations are made in transient state to evaluate the software capability in modeling time related phenomenon.

The results show that turbulence models have an important role in the shear velocity prediction. It can be concluded that, relatively to the second point, that erosion shall occur for all time intervals studied. In transient state simulations the time step, the undisturbed velocity and the configuration of the hill affect the shear velocity distribution. Therefore, all this parameters must be taken into account when defining a simulation of this kind.

Keywords Erosion, Numerical simulation, Hill, Shear velocity, Separation, Reattachment.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	9
3.1. Construção do modelo	9
3.2. Geração da malha.....	10
3.3. Pré-processamento	13
3.3.1. Escoamento.....	13
3.3.2. Modelos de turbulência	14
3.3.3. Condições de fronteira.....	14
3.3.4. Resolução das equações.....	16
3.3.5. Obtenção de resultados.....	17
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	19
4.1. Estudo da influência do modelo de turbulência.....	19
4.1.1. Colina isolada	19
4.1.2. Colinas dispostas em <i>tandem</i>	22
4.1.3. Comparação entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em <i>tandem</i>	25
4.2. Estudo da correlação entre os perfis de erosão e a distribuição da velocidade de atrito para o caso da colina isolada.....	27
4.2.1. Estudo de independência de malha.....	28
4.2.2. Estudo dos perfis de erosão	31
4.3. Estudo em regime transiente.....	32
4.3.1. Colina isolada	34
4.3.2. Colinas dispostas em <i>tandem</i>	37
5. CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
6. ANEXO A	43
6.1. Instante $t= 2$ min	43
6.2. Instante $t= 4$ min	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura do escoamento a jusante do ponto de separação (Frank & Kocurek 1996).....	3
Figura 2.2. Estrutura do escoamento para colinas submersas em água (McLean & Smith 1986).....	5
Figura 2.3. Estrutura do escoamento a jusante do ponto de separação para (a) colina isolada e (b) colinas em <i>tandem</i> em condições de escoamento transversal ($0\pm 10^\circ$). A letra A representa a “ <i>outer flow</i> ”, a letra B “ <i>overflow</i> ”, a letra C a “ <i>upper wake</i> ”, a letra D a “ <i>lower wake</i> ”, a letra E a “ <i>separation cell</i> ”, a letra F a “ <i>mixing layer</i> ”, a letra G o “ <i>Reynolds’s Stress Maximum (RS_{max})</i> ”, H a “ <i>turbulent shear zone</i> ” e I a “ <i>internal boundary layer</i> ” (Walker & Nickling 2002).....	6
Figura 3.1. Representação gráfica do perfil da colina.	10
Figura 3.2. Dimensões do modelo utilizado.	10
Figura 3.3. Identificação das fronteiras do domínio.	11
Figura 3.4. Detalhe da malha utilizada.	13
Figura 4.1. Distribuição da velocidade de atrito, na colina isolada, para os modelos de turbulência estudados - $U_0= 8.3$ m/s (dados experimentais obtidos por Pinheiro (2011)).	20
Figura 4.2. Distribuição da velocidade de atrito, nas colinas dispostas em <i>tandem</i> , para os modelos de turbulência estudados – $U_0= 8.3$ m/s (dados experimentais obtidos por Pinheiro (2011)).	23
Figura 4.3. Comparação da distribuição da velocidade de atrito, entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em <i>tandem</i> , para o modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$. ($U_0=8.3$ m/s).....	26
Figura 4.4. Detalhe da malha utilizada – a) espaçamento fino; b) espaçamento médio; c) espaçamento grosseiro – instante $t= 0$ min.....	28
Figura 4.5. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – instante $t= 0$ min.....	29
Figura 4.6. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t= 0$ min.....	29
Figura 4.7. Perfis de erosão média (Fino 2011) (a tracejado) e relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica (a cheio), de uma colina isolada e velocidade $U_0= 9.1$ m/s.....	32
Figura 4.8. Distribuição da velocidade de atrito, ao longo do tempo, numa colina isolada para $U_0= 20$ m/s e modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$ – intervalo de tempo 1.	34

Figura 4.9. Distribuição da velocidade de atrito, para diversos instantes, numa colina isolada, para $U_0= 20$ m/s e modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$ – intervalo de tempo 2....	35
Figura 4.10. Variação da velocidade de atrito, ao longo do tempo, numa colina isolada, no ponto $x/H= 4.93$, para $U_0= 20$ m/s – intervalo de tempo 2.	36
Figura 4.11. Instante a partir do qual há variação da velocidade de atrito com o tempo – intervalo de tempo 2.	36
Figura 6.1. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – $t= 2$ min...	43
Figura 6.2. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t= 2$ min.....	44
Figura 6.3. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – $t= 4$ min...	46
Figura 6.4. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t= 4$ min.....	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros usados para a geração da malha (Pinheiro 2011).....	11
Tabela 3.2. Parâmetros usados na geração da camada de inflação (Pinheiro 2011).	12
Tabela 3.3. Características do escoamento (Pinheiro 2011).....	13
Tabela 3.4. Características da fronteira de Entrada (Pinheiro 2011).....	15
Tabela 3.5. Características da fronteira de Saída (Pinheiro 2011).	15
Tabela 3.6. Características da fronteira Topo (Pinheiro 2011).....	16
Tabela 3.7. Características da fronteira Base (Pinheiro 2011).	16
Tabela 4.1. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, na colina isolada, para os modelos de turbulência estudados. ($U_0= 8.3$ m/s)	21
Tabela 4.2. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, na colina isolada, obtida experimentalmente (Pinheiro 2011). ($U_0= 8.3$ m/s).....	21
Tabela 4.3. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, nas colinas dispostas em <i>tandem</i> , para os modelos de turbulência estudados. ($U_0= 8.3$ m/s)	24
Tabela 4.4. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, nas colinas dispostas em <i>tandem</i> , obtida experimentalmente (Pinheiro 2011). ($U_0= 8.3$ m/s).....	24
Tabela 4.5. Comparação da localização do ponto de separação e do ponto de recolamento entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em <i>tandem</i> , para o modelo de turbulência κ - ϵ . ($U_0= 8.3$ m/s)	26
Tabela 4.6. Parâmetros usados para a geração da malha – $t= 0$ min.	30
Tabela 4.7. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – $t= 0$ min.	30
Tabela 4.8. Intervalos de tempo usados na simulação em regime transiente – intervalo de tempo 2	33
Tabela 6.1. Parâmetros usados para a geração da malha – $t= 2$ min.	44
Tabela 6.2. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – $t= 2$ min.	45
Tabela 6.3. Parâmetros usados para a geração da malha – $t= 4, 6, 8, 10$ e 12 min.	47
Tabela 6.4. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – $t= 4, 6, 8, 10$ e 12 min.	48

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

νH – Altura máxima das colinas [m]

α – Ângulo de fricção interna do material [°]

θ – Ângulo de inclinação da vertente [°]

u – Componente média longitudinal da velocidade [m/s]

L – Comprimento da colina [m]

x – Coordenada horizontal (origem no ponto de altura máximo da colina) [m]

z – Coordenada vertical [m]

D – Diâmetro médio dos grãos de areia [m]

δ – Espessura da camada limite [m]

n – Expoente da lei de potência que define o perfil de velocidade

t_v – Instante de tempo a partir do qual há variação da distribuição da velocidade de atrito nas simulações em regime transiente [s]

ρ_{ar} – Massa volúmica do ar [kg/m³]

ρ_s – Massa volúmica do material granular [kg/m³]

Re – Número de Reynolds

τ_w – Tensão tangencial superficial [Pa]

u_* – Velocidade de atrito [m/s]

$u_{*t,0}$ – Velocidade de atrito crítica num leito plano [m/s]

$u_{*t,\theta}$ – Velocidade de atrito crítica num leito de inclinação θ [m/s]

U_0 – Velocidade do escoamento não perturbado [m/s]

ν – Viscosidade cinemática do fluido (ar) [m²/s]

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DNS – *Direct Numerical Simulations*

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

RANS – *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da erosão eólica, caracterizada pela erosão, transporte e deposição de partículas provocada pelo vento, tem resultados nefastos nomeadamente na remoção de partículas de pilhas de armazenamento de carvão, com consequências económicas e na dispersão de poluentes que afecta tanto áreas urbanas como de cultivo. Têm vindo a ser desenvolvidas soluções que permitem minorar este problema através da utilização de protecções porosas e de vegetação. Assim, consegue-se uma diminuição da velocidade do vento na proximidade das pilhas e, conseqüentemente, a diminuição da erosão. Destacam-se nesta área os estudos realizados por Farimani, Ferreira, & Sousa (2011); Ferreira & Lambert (2010); Lee, Park, & Park (2002); Sismeiro (2010); Youssef et al. (2012) e Zhang, Kang, & Lee (2010). Refere-se ainda o estudo realizado por Ferreira & Vaz (2004) relativamente à erosão de partículas de carvão quando transportadas em vagões e o desenvolvimento de protecções para a sua diminuição.

Uma das dificuldades com que os investigadores se debatem no estudo dos processos de erosão deve-se ao mecanismo de interacção (do inglês, *feedback mechanism*) que se estabelece entre o escoamento e pilhas erodíveis (Farimani, Ferreira, & Sousa 2011; Nelson, McLean, & Wolfe 1993). A presença de uma pilha afecta o escoamento, e o escoamento afecta a pilha, ao erodi-la. Este facto dificulta o conhecimento da evolução temporal e espacial tanto do escoamento como da forma da pilha. Recentemente, e com a evolução verificada ao nível do poder de cálculo dos computadores, os investigadores têm dado primazia à simulação numérica desenvolvendo modelos ao nível da dinâmica de fluidos computacional (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*, CFD) obtendo resultados que de outra forma seriam difíceis, ou mesmo impossíveis, de obter experimentalmente (Parsons et al. 2004). No entanto, os resultados destas simulações só podem ser validados se existirem dados experimentais que os suportem.

Neste trabalho faz-se um estudo computacional, recorrendo a um programa comercial, *CFX Ansys* versão 11.0, do escoamento em torno de colinas bidimensionais transversais. Este tipo de colinas forma-se quando a direcção predominante do vento forma um ângulo de $90\pm 20^\circ$ com a linha de crista (Sweet & Kocurek 1990). As colinas referidas

são definidas por uma equação sinusoidal, com um comprimento $6H$, representando H a altura máxima destas. Refere-se ainda que as colinas irão ser estudadas em duas configurações distintas: colina isolada e duas colinas dispostas em *tandem* com distância nula entre si.

O trabalho encontra-se dividido em quatro partes, para além da presente.

No segundo capítulo, referente à pesquisa bibliográfica, apresenta-se a evolução do conhecimento relativo à estrutura do escoamento a jusante da crista de uma colina em condições em que ocorre separação. Realiza-se ainda uma comparação com a estrutura do escoamento em colinas submersas em água.

O terceiro capítulo é dedicado à definição da geometria das colinas estudadas, à construção dos modelos e respectiva malha e à especificação das condições de fronteira, sendo referida toda a informação relevante para a compreensão das etapas que é necessário ultrapassar até à obtenção de resultados.

No quarto capítulo é efectuada a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Este capítulo encontra-se dividido em três secções.

A primeira secção é dedicada ao estudo da influência do modelo de turbulência na evolução da velocidade de atrito e na localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento, para uma colina isolada e duas em *tandem*, e para uma velocidade do escoamento não perturbado de $U_0 = 8.3$ m/s. É ainda efectuada uma comparação entre os resultados obtidos para as duas configurações estudadas.

Na segunda secção, e utilizando os perfis de erosão média de uma colina isolada para $U_0 = 9.1$ m/s obtidos por Fino (2011), obtém-se a distribuição da relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica, ao longo do tempo, e discute-se a sua concordância, ou não, com os resultados experimentais.

Na terceira secção realiza-se um estudo em regime transitório para as duas configurações estudadas, com o objectivo de determinar se o modelo computacional consegue prever os fenómenos transientes. Em consequência desse estudo são realçados alguns parâmetros-chave neste tipo de simulação.

Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as principais conclusões a retirar deste trabalho e são feitas sugestões de trabalho futuro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo pretende-se contextualizar o tema da presente tese na investigação que vem sendo realizada nesta área. Aborda-se a estrutura do escoamento a jusante da crista de uma colina quando ocorre separação do escoamento. Compara-se esse modelo com o proposto para colinas submersas em água.

Frank & Kocurek (1996), denotando uma lacuna no conhecimento da estrutura do escoamento a jusante da crista de uma colina quando ocorre separação, conduziram um estudo, em três locais distintos, sobre colinas transversais. O conhecimento da estrutura do escoamento na face jusante de colinas é fundamental pois permite determinar em que camada deverão ser extraídos os dados necessários para o cálculo da velocidade de atrito, o que influencia o cálculo da taxa de transporte de sedimentos. Os dados necessários para a determinação dos perfis de velocidade foram obtidos através de medições utilizando anemómetros de três copos. Esses perfis de velocidade permitiram identificar quatro camadas distintas no escoamento: uma bolha de recirculação, uma esteira formada por duas camadas e uma camada limite interna (Figura 2.1).

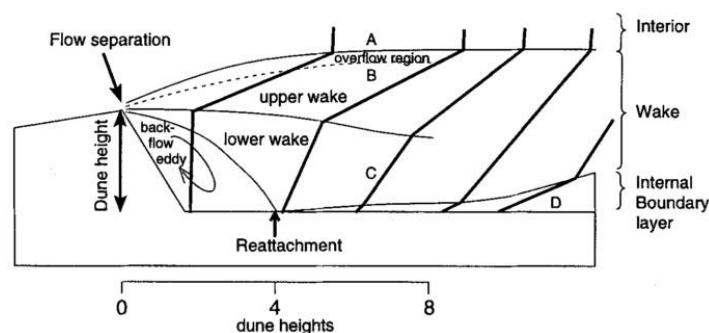


Figura 2.1. Estrutura do escoamento a jusante do ponto de separação (Frank & Kocurek 1996)

A camada mais afastada da superfície, denominada interior (“*interior*”), identificável na Figura 2.1 pela letra A, é caracterizada por velocidades do vento elevadas com uma variação reduzida na direção do escoamento (Frank & Kocurek 1996).

Abaixo da camada A encontra-se a esteira (“*wake*”) que pode ser vista como uma região de recuperação do escoamento. A esteira pode ser dividida em duas camadas,

superior e inferior, letras B e C, respectivamente. A porção superior da camada B apresenta velocidades do vento elevadas mas que desaceleram para jusante, enquanto a porção inferior apresenta um comportamento inverso, ou seja, velocidades baixas que aceleram para jusante. Consequentemente, o gradiente de velocidade na camada B da esteira diminui na direcção do escoamento. Na camada C o escoamento é acelerado devido à transferência de quantidade de movimento de camadas superiores. Esta aceleração é mais notória no topo desta região, fazendo com que o gradiente de velocidade aumente para jusante. A linha que separa as duas regiões da esteira aproxima-se da superfície para jusante. Devido às características apresentadas pelas camadas B e C, a distinção entre elas desvanece-se a uma distância típica de $8H$ do ponto de separação (Frank & Kocurek 1996).

A camada mais próxima da superfície, a camada limite interna (região D), começa a desenvolver-se a partir do ponto de recolamento do escoamento aumentando a sua espessura para jusante. Esta região é caracterizada por um gradiente de velocidade elevado. Devido à espessura inicial reduzida, esta camada só é claramente identificável a uma distância $8H$ do ponto de separação (Frank & Kocurek 1996).

Na bolha de recirculação, a velocidade do vento é insuficiente para causar erosão das dunas estudadas, observando-se uma avalanche devido à gravidade e deposição de partículas transportadas pelo escoamento de montante. Em média, a bolha de recirculação atinge um comprimento típico de $4H$ (Frank & Kocurek 1996).

Embora o trabalho desenvolvido por Frank & Kocurek (1996) tenha tido uma importância fundamental no conhecimento da estrutura do escoamento a jusante de colinas, as conclusões apresentadas carecem da utilização de uma maior resolução espacial dos anemómetros, especialmente na proximidade da superfície.

As camadas do escoamento identificadas por Frank & Kocurek (1996) são comparáveis às descritas por McLean & Smith (1986) observadas em colinas submersas em água (Figura 2.2).

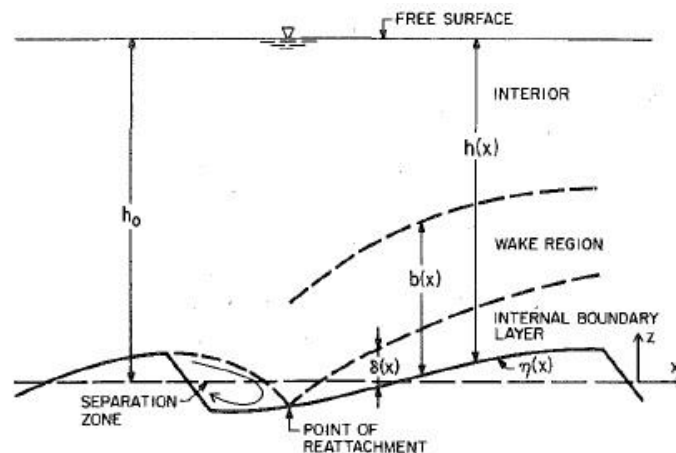


Figura 2.2. Estrutura do escoamento para colinas submersas em água (McLean & Smith 1986).

No modelo proposto por McLean & Smith (1986) a camada interior corresponde à camada A do modelo de Frank & Kocurek (1996). A esteira é caracterizada por ser uma zona a jusante da duna com um déficit de quantidade de movimento. No modelo das dunas submersas é proposto que a interacção entre a camada limite interna e a esteira influencia a tensão superficial e o espaçamento entre dunas. Nesse modelo, a transferência de quantidade de movimento das camadas superiores para a camada limite interna opõe-se a qualquer tendência de desaceleração do escoamento devido ao crescimento dessa camada. Assim, o escoamento acelera para jusante aumentando a tensão de atrito nessa direcção. A uma distância suficientemente grande, a desaceleração do escoamento decorrente do crescimento da camada limite iguala ou supera o efeito da transferência de quantidade de movimento e a aceleração do escoamento cessa.

Walker & Nickling (2002), combinando resultados obtidos por Frank & Kocurek (1996), Walker & Nickling (2003) e por Walker (2000), desenvolveram a estrutura apresentada previamente para dois casos distintos: colina isolada e colinas dispostas em *tandem* (Figura 2.3). Essa estrutura foi obtida a partir de medições de perfis de velocidade, em colinas reais, em ensaios em túnel de vento e a partir de visualizações do escoamento nas duas situações.

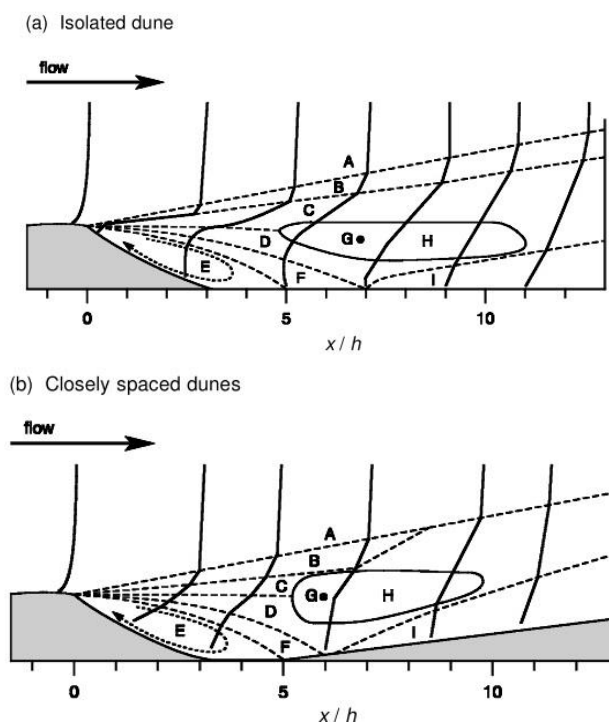


Figura 2.3. Estrutura do escoamento a jusante do ponto de separação para (a) colina isolada e (b) colinas em *tandem* em condições de escoamento transversal ($0 \pm 10^\circ$). A letra A representa a “outer flow”, a letra B “overflow”, a letra C a “upper wake”, a letra D a “lower wake”, a letra E a “separation cell”, a letra F a “mixing layer”, a letra G o “Reynolds’s Stress Maximum (RS_{max})”, H a “turbulent shear zone” e I a “internal boundary layer” (Walker & Nickling 2002)

Walker & Nickling (2002) dividiram a camada interior (“interior”), identificada por Frank & Kocurek (1996), em duas. A camada A não é afectada pela presença da colina e é caracterizada por um gradiente de velocidade relativamente baixo. A camada B é projectada da crista onde a velocidade diminui para jusante. No caso das colinas dispostas em *tandem*, esta camada coalesce com a camada superior da esteira num ponto situado a jusante do ponto de recolamento do escoamento.

As camadas C e D representam, respectivamente, as regiões superior e inferior da esteira já identificadas por Frank & Kocurek (1996).

A camada F, identificada como uma região de mistura (“mixing layer”), surge do facto da fronteira que delimita a bolha de recirculação não ser estável. Nesta camada ocorre libertação de pequenos vórtices que se expandem à medida que se deslocam para o ponto de recolamento (Walker & Nickling 2001).

O ponto G, definido como o ponto onde são máximas as tensões de Reynolds, ocorre a uma altura próxima da máxima da colina e aparenta controlar o ponto de recolamento do escoamento. Este ponto está incluído na camada H (“turbulent shear

zone”). Esta camada é definida pelo domínio onde é válida a condição $TR/TR_{máx} > 0.5$, representando TR as tensões de Reynolds (Walker & Nickling 2001).

As estruturas do escoamento aqui apresentadas foram definidas para duas dimensões. Walker & Nickling (2002) salientam, no entanto, a necessidade de medições tridimensionais do escoamento, nomeadamente a caracterização detalhada das camadas C a F e o conhecimento da influência da direcção do escoamento no desenvolvimento de estruturas tridimensionais.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo apresenta-se a descrição do procedimento seguido para a realização das simulações numéricas. Como referido anteriormente, foi usado um programa comercial, *CFX Ansys* versão 11.0, para a realização das simulações. Foi também usado o programa *SolidWorks* versão 2013 para a construção dos modelos.

O procedimento supracitado compreende diversas etapas, nomeadamente:

- Construção do modelo, *SolidWorks*
- Importação do modelo, *DesignModeler*
- Geração da malha, *Meshing*
- Pré-processamento, *CFX-Pre*
- Resolução de equações, *CFX-Solver*
- Obtenção de resultados, *CFX-Post*

3.1. Construção do modelo

A geometria das colinas estudadas neste trabalho é descrita por um perfil sinusoidal dado por:

$$z = \frac{H}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\pi \times \left(\frac{x}{L/2} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \quad (3.1)$$

em que z representa, em mm, a altura da colina num ponto de abcissa x (com origem na crista da colina) e H a altura máxima da mesma, 60 mm no presente estudo. Todas as colinas estudadas têm um comprimento $L=6H$, ou seja, 360 mm. A representação da colina, para valores de x compreendidos entre -180mm e +180mm, é feita na Figura 3.1.

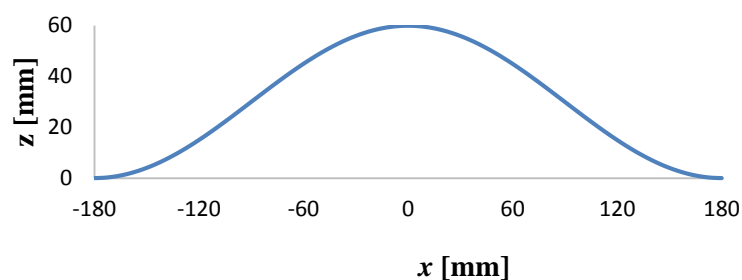


Figura 3.1. Representação gráfica do perfil da colina.

A construção do modelo iniciou-se com a importação para o *SolidWorks*, a partir do *Microsoft Excel* versão 2013, dos pontos que definem a colina. De seguida, construiu-se o restante modelo com as dimensões presentes na Figura 3.2.

A dimensão do domínio de cálculo tem influência nos resultados obtidos, pelo que é necessário realizar um estudo de independência daquele parâmetro. Esse estudo foi realizado por Pinheiro (2011), que constatou que as dimensões do domínio deveriam ser: $10H$ de altura, $20H$ de comprimento a montante da colina e $30H$ a jusante (ver Figura 3.2). Embora o estudo seja feito a duas dimensões, o programa foi desenvolvido para três dimensões, pelo que é necessário definir a espessura do domínio.

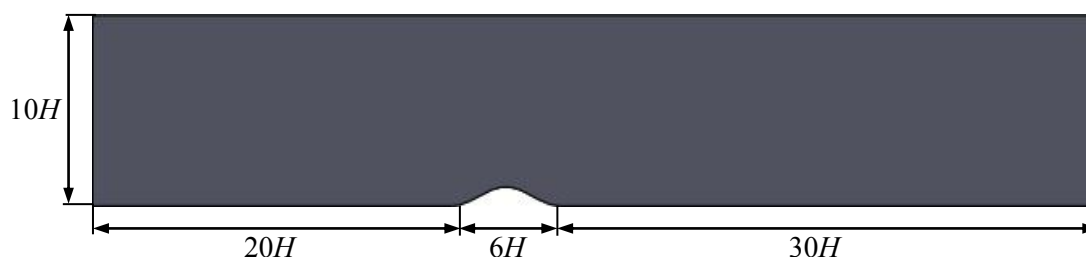


Figura 3.2. Dimensões do modelo utilizado.

3.2. Geração da malha

A criação da malha consiste na divisão do modelo em volumes de pequena dimensão, para os quais irão ser resolvidas as equações do escoamento. O número de volumes em que o modelo é dividido afecta o desempenho da simulação. Se se utilizar um maior número de volumes (de dimensões inferiores), ou seja, se se utilizar uma malha mais refinada, aumenta-se o tempo de simulação, comparativamente ao tempo necessário no caso de se utilizar uma malha grosseira. Acresce ainda que a dimensão da malha pode afectar os resultados a obter, sendo necessário realizar um estudo de independência de

malha. Esse estudo tem por objectivo a determinação dos parâmetros de uma malha tão grande quanto possível, sem que isso se reflecta nos resultados.

O primeiro passo neste módulo consiste na importação do modelo para o *Design Modeler*, de modo a criar um ficheiro compatível com o *CFX-Pre*. No *CFX-Pre*, inicia-se o trabalho com a criação de diferentes fronteiras, a que irão estar associadas diferentes condições de fronteira – Figura 3.3.

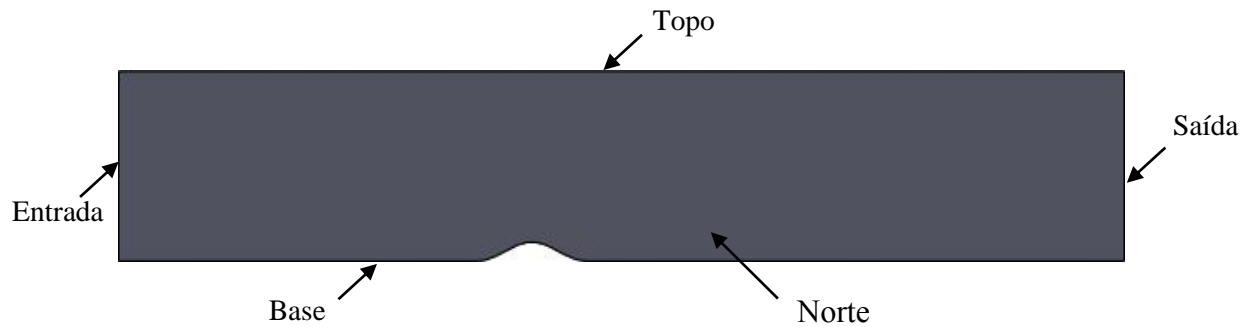


Figura 3.3. Identificação das fronteiras do domínio.

Nas secções 4.1 e 4.2 irá ser usada uma malha já definida por Pinheiro (2011) e, assim, referem-se na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 os parâmetros e valores definidos por esse autor. Os valores usados em malhas de outros modelos, dada a sua extensão, foram remetidos para o Anexo A.

Tabela 3.1. Parâmetros usados para a geração da malha (Pinheiro 2011).

	Body spacing	Option	Geral	Base
Spacing	Face spacing	Maximum spacing [mm]	10	-
		Angular resolution [degrees]	30	18
		Minimum edge length [mm]	2	2
		Maximum edge length [mm]	10	5
		Radius of influence [degrees]	-	0
		Expansion factor	-	1.2

Tabela 3.2. Parâmetros usados na geração da camada de inflação (Pinheiro 2011).

	Option	Base
Inflation	Number of inflated layers	30
	Expansion factor	1.1
	Minimum internal angle [degrees]	2.5
	Minimum external angle [degrees]	10
	Define first layer by	First layer thickness
	y^+	11
	Reynolds number	Depende de U_0
	Reference length [mm]	60
	First prism height [mm]	Depende de y^+ e de Re
	Extended layer growth	Yes
	Layer by layer smoothing	No

O uso de uma camada de inflação (do inglês, *inflation layer*) deve-se à necessidade de um maior refinamento de malha na proximidade da base, visto que os gradientes de velocidade nessa zona são muito elevados. Na fronteira Base também se opta por usar um espaçamento inferior ao usado nas restantes fronteiras do domínio por ser nessa que se irão extrair os resultados.

O número de Reynolds referido na Tabela 3.2 é calculado através de (3.2):

$$Re = \frac{U_0 L}{\nu}, \quad (3.2)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido ($\nu = 1.586E - 05 \text{ m}^2/\text{s}$, para uma temperatura de 25°C - (Incropera et al. 2011)) e L uma dimensão característica do corpo, neste caso a altura máxima das colinas, H .

Na Figura 3.4 apresenta-se um detalhe da malha.

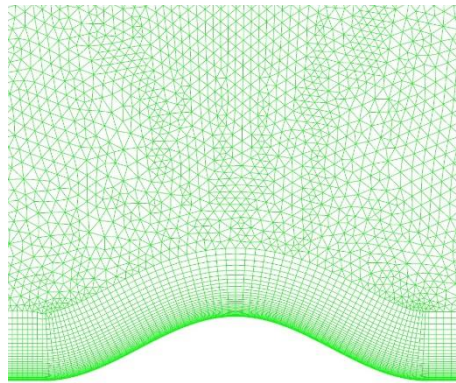


Figura 3.4. Detalhe da malha utilizada.

3.3. Pré-processamento

Nesta etapa definem-se as condições de fronteira para as fronteiras criadas e as características do escoamento.

3.3.1. Escoamento

Nas características do escoamento é necessário definir o tipo de fluido, a pressão, o modelo de turbulência e se deve ser considerada transferência de calor. A Tabela 3.3 resume as opções tomadas, tendo-se por base Pinheiro (2011).

Tabela 3.3. Características do escoamento (Pinheiro 2011).

Tipo de fluido	Pressão de referência	Regime	Transferência de calor	Modelo de turbulência
Ar a 25°C	1 atm	Varia	Isotérmico	Varia

Relativamente ao regime, e como foi referido no capítulo 1, irão ser realizadas simulações em regime permanente nas duas primeiras secções do capítulo 4 e em regime transiente na última. Em relação ao modelo de turbulência, as simulações relativas às duas primeiras secções do capítulo 4 utilizam diversos modelos, enquanto na terceira são utilizados os modelos κ - ϵ e *SSG Reynolds Stress*.

3.3.2. Modelos de turbulência

A turbulência é um fenómeno complexo que abrange um grande número de escalas temporais e espaciais. A simulação numérica directa (do inglês, *Direct Numerical Simulation – DNS*) implicaria assim a utilização de volumes de controlo e de intervalos de tempo muito reduzidos, o que o poder computacional actualmente existente não permite (Oliveira & Lopes 2010; Parsons et al. 2004). Torna-se assim necessário adaptar as equações de Navier-Stokes de modo a que os efeitos da turbulência no escoamento sejam modelados. Osborn Reynolds sugeriu uma alteração às referidas equações, em que cada variável é dividida numa componente média e numa componente flutuante (Oliveira & Lopes 2010). Estas expressões são designadas por equações médias de Navier-Stokes (do inglês, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, RANS*). Esta abordagem dá origem a incógnitas adicionais, que actuam como tensões no fluido, e são correntemente designadas por tensões de Reynolds. Essas tensões conduzem a um problema de fecho matemático, visto que o número de incógnitas é superior ao número de equações. Para superar esse problema recorre-se aos chamados modelos de turbulência (Oliveira & Lopes 2010).

O programa *CFX Ansys* disponibiliza diversos modelos de turbulência, que podem ser divididos em dois grupos: modelos de viscosidade turbulenta (do inglês, *Eddy viscosity models*) e modelos de tensões de Reynolds (do inglês, *Reynolds stress models*). No grupo dos modelos de viscosidade turbulenta incluem-se o κ - ϵ , *RNG* κ - ϵ , κ - ω , *Menter's Shear Stress Transport (SST)* e *Eddy Viscosity*. No segundo grupo encontram-se os modelos *QI Reynolds Stress*, *SSG Reynolds Stress* e o *BSL Reynolds Stress*.

3.3.3. Condições de fronteira

Nesta subsecção são explicadas as opções tomadas para cada fronteira criada aquando da definição da malha. Novamente, as opções foram baseadas no trabalho de Pinheiro (2011).

3.3.3.1. Entrada

Esta é uma fronteira do tipo *Inlet*. Os parâmetros necessários para a sua definição são resumidos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Características da fronteira de Entrada (Pinheiro 2011).

Tipo de fronteira	Regime do escoamento	Perfil de velocidade	Intensidade de turbulência
Entrada	Subsónico	Perfil (z)	Alta [10%]

O perfil de velocidade referido na Tabela 3.4 é uma aproximação ao medido experimentalmente no túnel de vento instalado no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) da ADAI (Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial – Universidade de Coimbra, Portugal). Esse perfil pode ser definido por uma lei de potência:

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{\delta} \right)^n, \quad (3.3)$$

onde u é a componente longitudinal média da velocidade a uma distância z do solo, δ a espessura da camada limite que assume o valor 0.1 m e n o expoente da lei de potência que toma o valor de 0.11 (Faria et al. 2011). O valor usado para a intensidade de turbulência decorre, também, da sua medição em ensaios experimentais (Ferreira & Lambert 2010).

3.3.3.2. Saída

Tabela 3.5. Características da fronteira de Saída (Pinheiro 2011).

Tipo de fronteira	Regime do escoamento	Pressão relativa
Saída	Subsónico	0 [Pa]

Esta fronteira é do tipo *Outlet*. Nesta fronteira assume-se que o escoamento se encontra plenamente desenvolvido, ou seja, que o gradiente de todas as variáveis é nulo na direcção do escoamento. A pressão estática é considerada igual a zero (Faria et al. 2011; Pinheiro 2011).

3.3.3.3. Topo

Tabela 3.6. Características da fronteira Topo (Pinheiro 2011).

Tipo de fronteira	Regime do escoamento	Pressão relativa	Intensidade de turbulência
Abertura	Subsónico	0 [Pa]	Alta [10%]

3.3.3.4. Base

Tabela 3.7. Características da fronteira Base (Pinheiro 2011).

Tipo de fronteira	Regime do escoamento	Rugosidade (K_s)
Parede	Sem escorregamento	$D/10=5E-05$ [m]

Na Tabela 3.7, a rugosidade é definida a partir do diâmetro médio da partícula, D , tendo um impacto significativo nos resultados. O seu valor foi definido por Pinheiro (2011), sendo o que conduz a resultados numéricos mais próximos dos experimentais obtidos por esse autor.

3.3.3.5. Norte e Sul

A fronteira Norte é a zona frontal do domínio, vista da perspectiva da Figura 3.3. A região Sul é a fronteira traseira. Estas fronteiras são do tipo simetria não sendo necessário definir nenhum parâmetro adicional.

3.3.4. Resolução das equações

Nesta etapa, relativa ao módulo *CFX-Solver*, resolvem-se as equações do escoamento: conservação de massa, conservação da quantidade de movimento e as relativas ao modelo de turbulência seleccionado. No módulo *CFX-Pre*, foi definido que a simulação estaria concluída quando pelo menos uma das seguintes situações ocorresse: número máximo de iterações (500 iterações) atingido, ou se o resíduo das variáveis fosse

inferior ao valor máximo de 1×10^{-5} (Pinheiro 2011). Em todas as simulações que convergiram, o número máximo de iterações nunca foi atingido, que é o caso ideal.

3.3.5. Obtenção de resultados

No módulo *CFX-Post* podem ser obtidos todos os resultados pretendidos. Neste trabalho os principais dados a obter consistiram na distribuição da tensão tangencial e da velocidade longitudinal na fronteira Base. Para tal foi criado um plano paralelo à fronteira Norte, a uma distância de 5 mm desta (a largura do domínio era 10 mm). De seguida criou-se uma polilinha que intersecta esse plano com a fronteira Base. Dessa polilinha extraiu-se a informação necessária para ficheiros de texto. Esses ficheiros de texto foram posteriormente analisados recorrendo ao *Microsoft Excel* versão 2013.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Estudo da influência do modelo de turbulência

Nesta secção apresenta-se a distribuição da velocidade de atrito, u_* , ao longo da superfície da colina, para os vários modelos de turbulência testados, e para as duas configurações. A velocidade do escoamento não perturbado é de 8.3 m/s.

A velocidade de atrito é definida por (4.1):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{ar}}}, \quad (4.1)$$

onde τ representa a tensão tangencial na superfície e ρ_{ar} a massa volúmica do fluido (ar) a 25°C, $\rho_{ar} = 1.184 \text{ kg/m}^3$.

Nas figuras a seguir apresentadas opta-se por exibir apenas a parte do domínio em que as diferenças entre os modelos de turbulência são mais significativas.

4.1.1. Colina isolada

Nesta subsecção apresentam-se os dados computacionais relativos à colina isolada, os quais serão comparados com os resultados experimentais obtidos por Pinheiro (2011).

A distribuição da velocidade de atrito é igual para os modelos de turbulência *SSG Reynolds Stress* e *QI Reynolds Stress*.

A distribuição da velocidade de atrito é semelhante para os modelos κ - ϵ e *Eddy Viscosity*, κ - ω e *BSL Reynolds Stress* e para os modelos *RNG* κ - ϵ e *SST*. A diferença ocorre na extensão da bolha de recirculação (ver Tabela 4.1). Pelas razões apontadas, omitem-se da Figura 4.1 os resultados relativos aos modelos *QI Reynolds Stress*, *Eddy Viscosity*, *BSL Reynolds Stress* e *RNG* κ - ϵ .

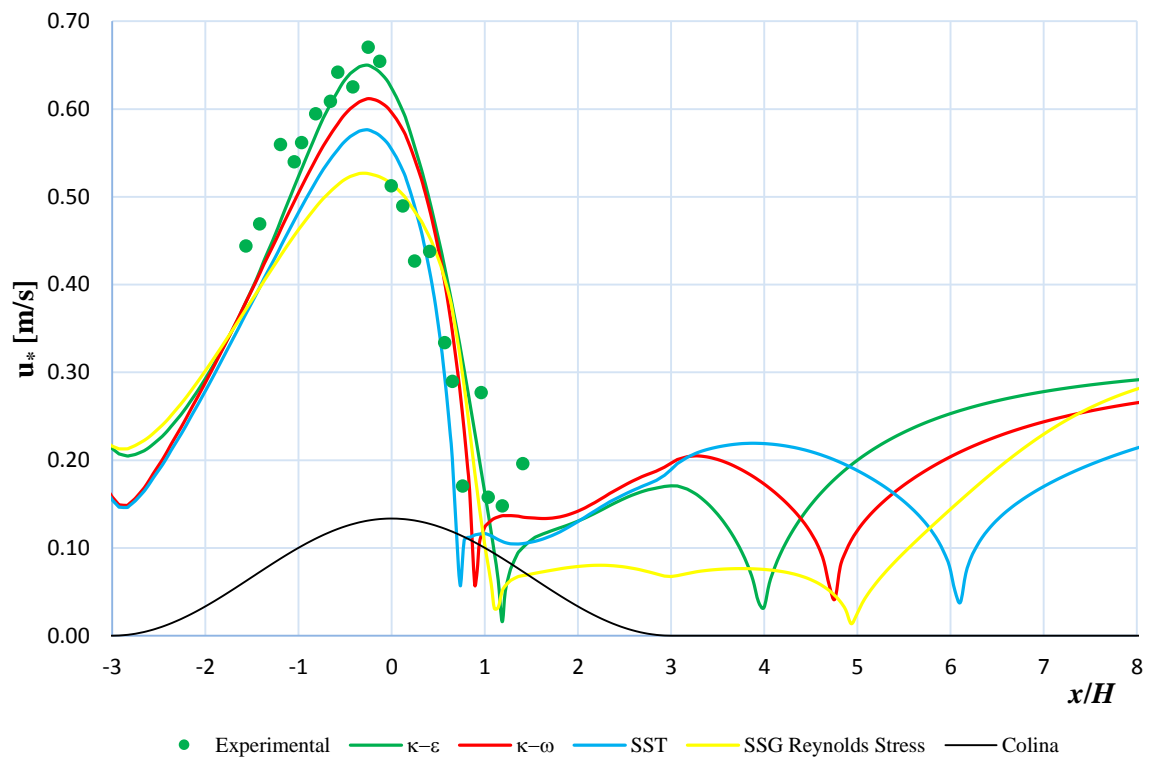


Figura 4.1. Distribuição da velocidade de atrito, na colina isolada, para os modelos de turbulência estudados - $U_0 = 8.3$ m/s (dados experimentais obtidos por Pinheiro (2011)).

Tabela 4.1. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, na colina isolada, para os modelos de turbulência estudados. ($U_0=8.3$ m/s)

Modelo de turbulência	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]
$\kappa-\varepsilon$	1.19	3.97	2.78
<i>Eddy viscosity</i>	1.29	3.79	2.50
$\kappa-\omega$	0.89	4.68	3.79
<i>BSL Reynolds Stress</i>	0.91	4.35	3.44
<i>RNG $\kappa-\varepsilon$</i>	0.96	5.89	4.93
<i>SST</i>	0.75	5.97	5.22
<i>SSG Reynolds Stress</i>	1.12	4.95	3.83
<i>QI Reynolds Stress</i>	1.12	4.95	3.83

Tabela 4.2. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, na colina isolada, obtida experimentalmente (Pinheiro 2011). ($U_0=8.3$ m/s)

Método	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]
Fios de lã	1.17	3.83	2.66
Sonda de 7 furos	0.83	4.33	3.50

Por análise da Figura 4.1, na face de montante da colina a velocidade de atrito aumenta, devido à aceleração do escoamento, atingindo o máximo sensivelmente no ponto $x/H= -0,29$, ou seja, ligeiramente a montante da crista. A partir desse ponto há um decréscimo rápido até um valor mínimo no ponto de separação (que se situa sensivelmente em $x/H= 1.03$). Imediatamente a jusante da separação a velocidade de atrito aumenta

ligeiramente para todos os modelos de turbulência. Na bolha de recirculação, e para o modelo *SSG Reynolds Stress*, a velocidade de atrito mantém-se praticamente constante, com um valor cerca de 20% do valor máximo. Para os modelos *SST*, κ - ε e κ - ω , a velocidade de atrito na bolha de recirculação oscila mas mantém-se sempre em valores baixos (valores cerca de 3 vezes inferiores aos verificados na crista da colina). Esta constatação está de acordo com os resultados experimentais de Fino (2011) onde a erosão nesta zona é pouco significativa. Para todos os modelos, no ponto de recolamento ($x/H=4.82$, em média) a velocidade de atrito atinge outro mínimo (por a velocidade do escoamento ser aí nula). A jusante desse ponto, a velocidade de atrito aumenta e torna-se constante, com um valor cerca de 50% do valor máximo. Relativamente aos valores experimentais obtidos por Pinheiro (2011) verifica-se que, devido à escassez de dados, não é possível inferir qual o modelo de turbulência que melhor se adequa.

Da análise da Tabela 4.1 conclui-se que a maior extensão da zona de recirculação acontece para o modelo *SST*. O oposto acontece para o modelo *Eddy viscosity*.

Da análise da Tabela 4.2 constata-se uma elevada incerteza experimental já que os resultados obtidos pelos dois métodos experimentais diferem bastante. Comparando estes com os obtidos numericamente conclui-se que, relativamente ao método de fios de lã, o modelo de turbulência que mais se aproxima é o κ - ε . Relativamente ao método da sonda de 7 furos, é o κ - ω .

4.1.2. Colinas dispostas em *tandem*

Nesta subsecção apresentam-se os dados computacionais relativos às colinas dispostas em *tandem*. São também incluídos resultados experimentais obtidos por Pinheiro (2011).

Com o modelo κ - ε não se verificou separação do escoamento na colina de jusante.

Nos modelos *SSG Reynolds Stress* e *QI Reynolds Stress* a velocidade de atrito é superior na colina de jusante, comparativamente à colina de montante. Esta singularidade está parcialmente de acordo com os resultados experimentais de Fino (2011), visto que, para a velocidade em apreço (8.3 m/s), a colina de montante não é erodida, verificando-se erosão apenas na colina de jusante. No entanto, e dados os valores da velocidade de atrito em ambas as colinas (ver Figura 4.2), seria expectável que ocorresse erosão em ambas.

Verifica-se ainda que a distribuição da velocidade de atrito é muito semelhante para os dois modelos referidos. Salienta-se porém que a extensão das bolhas de recirculação é maior no modelo *SSG Reynolds Stress* (Tabela 4.3).

Nos modelos $\kappa\text{-}\varepsilon$ e *Eddy Viscosity* a distribuição da velocidade de atrito é semelhante, exceptuando a particularidade referida em que no modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$ não se verifica separação na colina de jusante.

Nos modelos $\kappa\text{-}\omega$ e *BSL Reynolds Stress* a distribuição da velocidade de atrito é praticamente igual. A diferença reside na extensão das zonas de separação, que são ligeiramente maiores no modelo $\kappa\text{-}\omega$ (Tabela 4.3).

Nos modelos *SST* e *RNG $\kappa\text{-}\varepsilon$* a distribuição da velocidade de atrito é muito semelhante. Destaca-se a diferença na extensão das bolhas de recirculação (Tabela 4.3) e no facto da velocidade de atrito nessa zona ser superior no modelo *SST*.

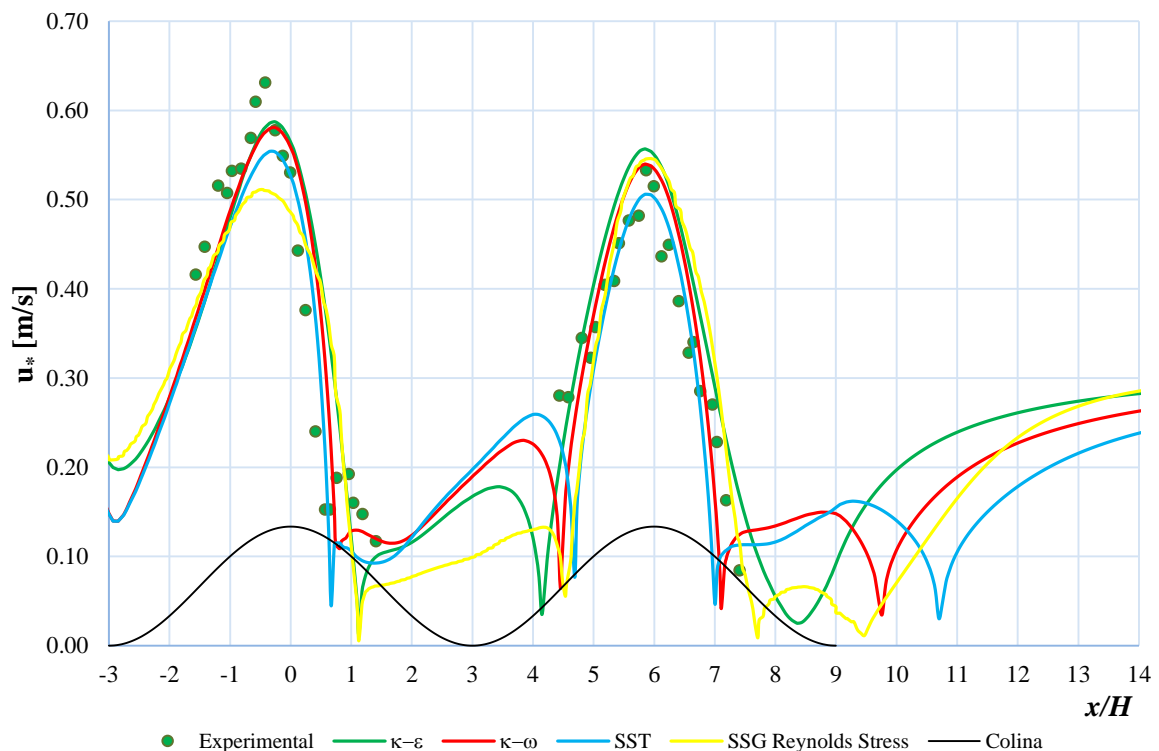


Figura 4.2. Distribuição da velocidade de atrito, nas colinas dispostas em *tandem*, para os modelos de turbulência estudados – $U_0 = 8.3$ m/s (dados experimentais obtidos por Pinheiro (2011)).

Tabela 4.3. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, nas colinas dispostas em *tandem*, para os modelos de turbulência estudados. ($U_0 = 8.3$ m/s)

Modelo de turbulência	Colina de montante			Colina de jusante		
	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]
$\kappa-\epsilon$	1.12	4.16	3.03	-	-	-
<i>Eddy viscosity</i>	1.17	4.28	3.11	7.83	9.34	1.51
$\kappa-\omega$	0.78	4.46	3.69	7.11	9.75	2.64
<i>BSL Reynolds Stress</i>	0.78	4.35	3.57	7.16	9.55	2.39
<i>RNG $\kappa-\epsilon$</i>	0.90	4.64	3.74	7.38	9.92	2.54
<i>SST</i>	0.66	4.68	4.02	7.00	10.71	3.71
<i>SSG Reynolds Stress</i>	1.03	4.49	3.46	7.48	9.23	1.75
<i>QI Reynolds Stress</i>	1.11	4.27	3.16	7.88	8.55	0.67

Tabela 4.4. Localização do ponto de separação, do ponto de recolamento e extensão da bolha de recirculação, nas colinas dispostas em *tandem*, obtida experimentalmente (Pinheiro 2011). ($U_0 = 8.3$ m/s)

Método	Colina de montante			Colina de jusante		
	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]	Ponto de separação [x/H]	Ponto de recolamento [x/H]	Extensão da bolha de recirculação [x/H]
Fios de lã	0.83	3.92	3.09	7.50	8.50	1.00
Sonda de 7 furos	0.83	4.50	3.67	7.17	8.83	1.66

Analisando a Figura 4.2, a distribuição da velocidade de atrito é similar à descrita para a colina isolada. Na face de montante da primeira colina a velocidade de

atrito aumenta devido à aceleração do escoamento. O máximo é atingido ligeiramente a montante da crista ($x/H = -0.31$). Na face de jusante a velocidade de atrito diminui à medida que o escoamento se expande, atingindo o mínimo no ponto de separação que se situa, sensivelmente, no ponto $x/H = 0.94$. Na zona de recirculação a velocidade de atrito aumenta mas mantém-se em valores reduzidos. Não é por isso expectável que ocorra erosão nessa zona, o que está de acordo com os resultados experimentais de Fino (2011). Imediatamente antes do ponto de recolamento ($x/H = 4.42$, em média), há um decréscimo acentuado da velocidade de atrito. A jusante deste ponto a velocidade de atrito aumenta novamente, atingindo o máximo ligeiramente antes da crista, no ponto $x/H = 5.88$ (em média). De seguida decresce, atingindo o mínimo no ponto de separação ($x/H = 7.40$, em média). Na bolha de recirculação a velocidade de atrito aumenta até um valor máximo, variável consoante o modelo, decrescendo até atingir novamente um mínimo no ponto de recolamento ($x/H = 9.58$, em média), onde, por definição, a velocidade se anula. Tal verificou-se para todos os modelos exceptuando o $\kappa-\varepsilon$ que não apresenta separação a jusante da segunda colina. De seguida, a velocidade de atrito aumenta novamente, estabilizando num valor próximo de 0.30 m/s.

Relativamente aos dados experimentais, não é possível concluir se existe um modelo de turbulência com o qual a distribuição de atrito se aproxime desses resultados, devido à sua escassez.

Da análise da Tabela 4.3 pode constatar-se que é no modelo de turbulência *SST* que a extensão das zonas de recirculação é maior. Por outro lado, a extensão da bolha de recirculação na colina de montante é menor para o modelo $\kappa-\varepsilon$, enquanto para a colina de jusante é menor para o modelo *QI Reynolds Stress*.

4.1.3. Comparação entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em *tandem*

Nesta secção apresenta-se uma comparação de resultados entre as duas configurações estudadas, utilizando-se o modelo $\kappa-\varepsilon$.

Ao analisar a Figura 4.3 conclui-se que, no caso das colinas dispostas em *tandem*, a presença da colina de jusante afecta a distribuição da velocidade de atrito na colina de montante, fazendo com que haja um decréscimo desta variável ao longo de toda a colina. A presença da segunda colina também afecta a localização dos pontos de separação

e recolamento como se observa na Tabela 4.5. Na configuração em *tandem*, o ponto de separação desloca-se para montante, enquanto o ponto de recolamento se desloca para jusante, aumentando assim a extensão da bolha de recirculação.

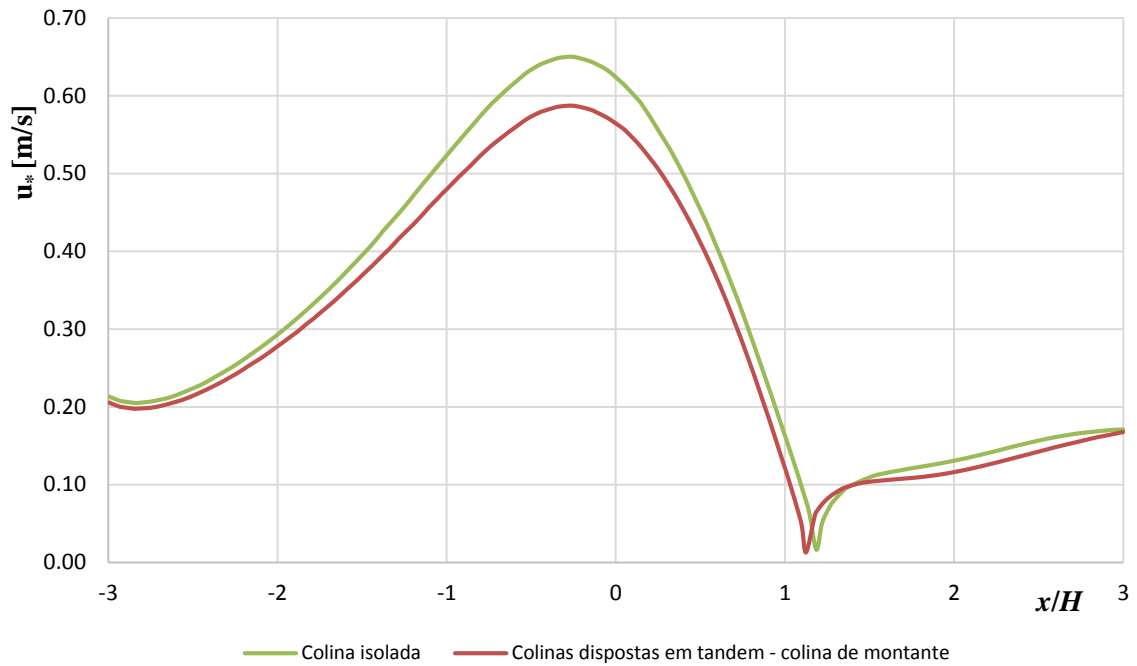


Figura 4.3. Comparação da distribuição da velocidade de atrito, entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em *tandem*, para o modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$. ($U_0=8.3$ m/s)

Tabela 4.5. Comparação da localização do ponto de separação e do ponto de recolamento entre a colina isolada e a colina de montante quando dispostas em *tandem*, para o modelo de turbulência $\kappa-\varepsilon$. ($U_0= 8.3$ m/s)

Modelo de turbulência	Ponto de separação [x/H]		Ponto de recolamento [x/H]	
	Isolada	<i>Tandem</i>	Isolada	<i>Tandem</i>
$\kappa-\varepsilon$	1.19	1.12	3.97	4.16

4.2. Estudo da correlação entre os perfis de erosão e a distribuição da velocidade de atrito para o caso da colina isolada

Nesta secção apresenta-se o estudo sobre os perfis de erosão média de uma colina isolada. Estes dados foram obtidos por Fino (2011) expondo uma pilha isolada constituída por areia a um escoamento de velocidade não perturbada de 9.1 m/s. As medições do perfil foram feitas para os instantes de tempo $t= 0, 2, 4, 6, 8, 10$ e 12 min. Com este estudo numérico pretendia-se avaliar se computacionalmente haveria um instante de tempo a partir do qual não se deveria verificar a erosão da colina.

A erosão da colina verifica-se quando a relação entre a velocidade de atrito, (4.1), e a velocidade de atrito crítica, (4.3), é superior à unidade, (4.2). A velocidade de atrito crítica numa vertente de ângulo θ é definida por (4.3) (Iversen & Rasmussen 1994).

$$\frac{u_*}{u_{*,\theta}}, \quad (4.2)$$

$$u_{*,\theta} = \sqrt{u_{*,0}^2 \left(\cos \theta + \frac{\sin \theta}{\operatorname{tg} \alpha} \right)}, \quad (4.3)$$

$$u_{*,0} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D}, \quad (4.4)$$

onde $u_{*,0}$ representa a velocidade de atrito crítica num leito plano, calculada através de (4.4) (Bagnold 1941), e α o ângulo de fricção interna do material, que pode ser considerado igual ao ângulo de repouso (33°) (Pye & Tsoar 1990).

Em (4.4), A é uma constante adimensional que toma o valor 0.1, ρ_s a densidade do material granular (2750 kg/m^3), ρ_{ar} a densidade do fluido (1.184 kg/m^3), g a aceleração da gravidade (9.81 m/s^2) e D o diâmetro médio dos grãos de areia (0.5 mm).

O valor do ângulo da vertente, θ , é calculado por (4.5):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \right), \quad (4.5)$$

onde x_1 e x_2 representam as abcissas de dois pontos consecutivos, e z_1 e z_2 as respectivas ordenadas calculadas através de (3.1).

4.2.1. Estudo de independência de malha

Para todos os perfis de erosão estudados foi necessário gerar as malhas. Foi também necessário realizar um estudo de independência de malha. Foram realizados testes relativamente ao espaçamento da malha e ao número de camadas de inflação. Relativamente ao espaçamento alteraram-se os valores dos parâmetros *maximum spacing*, *minimum edge length* e *maximum edge length*. Quanto à camada de inflação apenas se alterou o número de camadas.

Apresenta-se nos gráficos seguintes o estudo relativo ao instante de tempo $t=0$ min. Os dados relativos aos restantes instantes de tempo, dada a sua extensão, podem ser consultados no Anexo A.

Na Figura 4.4 representa-se um detalhe da malha, para os três espaçamentos usados, e para o instante de tempo $t=0$ min.

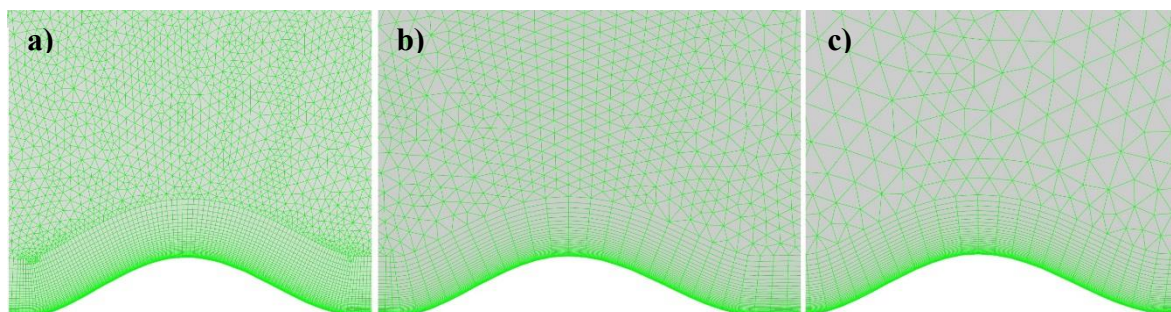


Figura 4.4. Detalhe da malha utilizada – a) espaçamento fino; b) espaçamento médio; c) espaçamento grosseiro – instante $t=0$ min.

Na Figura 4.5 apresenta-se a distribuição da velocidade de atrito para os três espaçamentos usados. A distribuição é igual para os casos da malha intermédia e malha grosseira. Como a diferença existente entre estas e a malha fina é pouco significativa, opta-se por usar a malha grosseira.

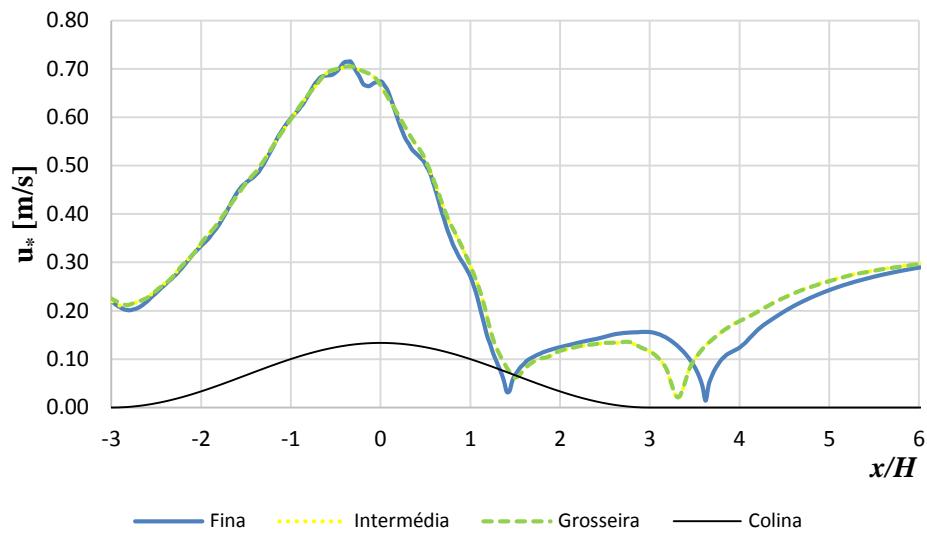


Figura 4.5. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – instante $t=0$ min.

Na Figura 4.6 apresenta-se a influência do número de camadas de inflação na distribuição da velocidade de atrito.

A distribuição é igual com 30 ou com 50 camadas. A utilização de 15 camadas é excluída dada a diferença significativa existente. Assim, utilizam-se 30 camadas de inflação no modelo final.

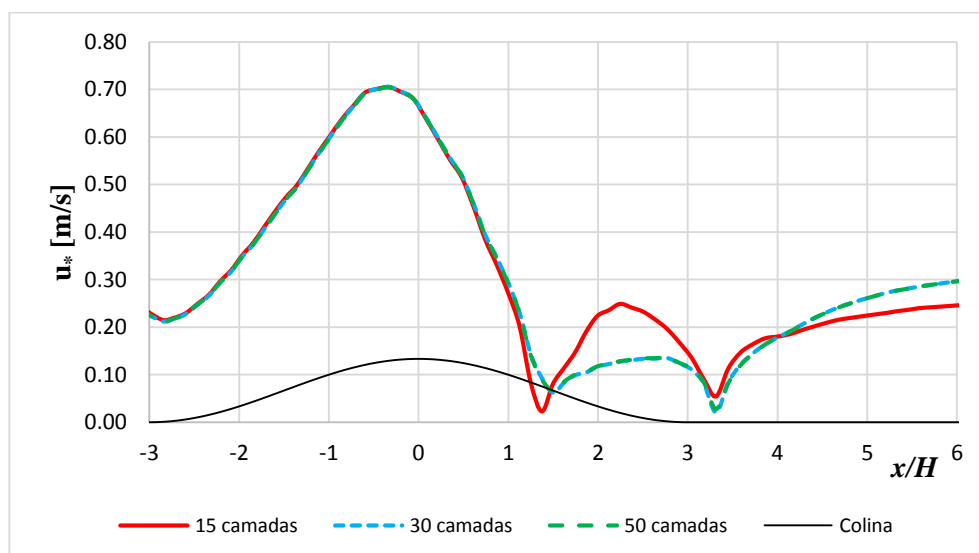


Figura 4.6. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t=0$ min.

Na Tabela 4.6 e na Tabela 4.7 resumem-se os parâmetros usados para a definição da malha e da camada de inflação, respectivamente.

Tabela 4.6. Parâmetros usados para a geração da malha – t= 0 min.

	Body spacing	Option	Geral	Base
	Spacing	Face spacing	Maximum spacing [mm]	30
Angular resolution [degrees]			30	18
Minimum edge length [mm]			15	10
Maximum edge length [mm]			30	15
Radius of influence [degrees]			-	0
Expansion factor			-	1.2

Tabela 4.7. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – t= 0 min.

	Option	Base
Inflation	Number of inflated layers	30
	Expansion factor	1.1
	Minimum internal angle [degrees]	2.5
	Minimum external angle [degrees]	10
	Define first layer by	First layer thickness
	y^+	11
	Reynolds number	34426
	Reference length [mm]	60
	First prism height [mm]	0.36 (aprox.)
	Extended layer growth	Yes
	Layer by layer smoothing	No

4.2.2. Estudo dos perfis de erosão

Na Figura 4.7 apresenta-se a tracejado o perfil médio da colina para os vários instantes de tempo quando esta é sujeita a um escoamento de velocidade 9.1 m/s (dados obtidos por Fino (2011)). Nas linhas a cheio representa-se a relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica obtida através de (4.2). A análise da Figura 4.7 permite afirmar que, com o passar do tempo, a erosão se dá numa faixa mais alargada mas com menor intensidade. Esta observação está de acordo com os resultados experimentais de Fino (2011). Nos instantes iniciais observa-se uma erosão significativa do topo da colina; à medida que esta fica progressivamente mais plana a taxa de erosão decresce. A partir dos 4 minutos a deposição de areia na face de jusante da colina torna-se significativa. Verifica-se ainda que, para todos os instantes de tempo estudados, a relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica nunca deixa de ser superior à unidade, ou seja, nunca deixa de existir erosão. Esta afirmação contraria outra, presente no artigo de Lopes et al. 2013, onde se conclui que a erosão devido à saltação cessa a partir dos 5 minutos, aproximadamente. Acrescenta-se ainda que, analisando a distribuição da velocidade longitudinal, apenas ocorre separação do escoamento para o instante inicial.

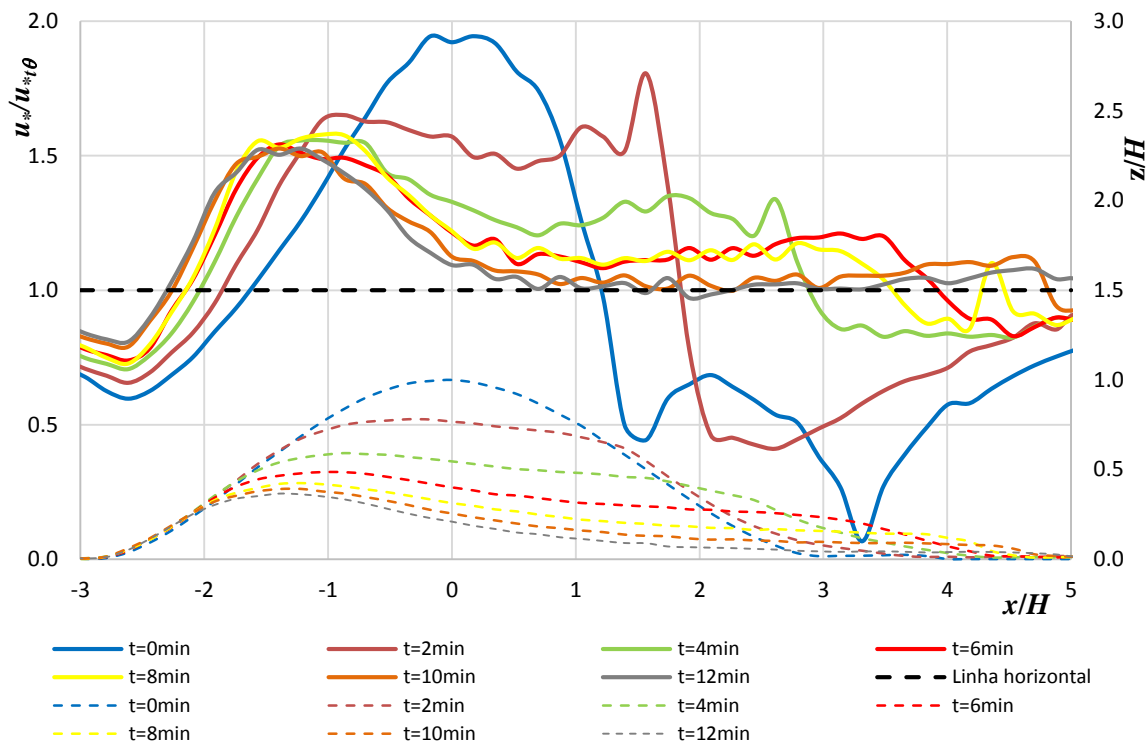


Figura 4.7. Perfis de erosão média (Fino 2011) (a tracejado) e relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica (a cheio), de uma colina isolada e velocidade $U_0 = 9.1$ m/s.

4.3. Estudo em regime transiente

Nesta secção apresenta-se o estudo em regime transiente da distribuição da velocidade de atrito para a colina isolada e em *tandem*. Foi usado primordialmente o modelo de turbulência $\kappa-\epsilon$, no entanto, e para a colina isolada, foi também testado o modelo *SSG Reynolds Stress*. Pretende-se averiguar se o modelo computacional tem a capacidade de modelar os efeitos transientes, nomeadamente a libertação de vórtices. Destacam-se, em consequência deste estudo, alguns parâmetros fundamentais neste tipo de simulação.

Na simulação em regime transiente, e no módulo *CFX-Pre*, é necessário definir alguns parâmetros adicionais, nomeadamente o intervalo de tempo para os quais as equações irão ser resolvidas, *time-step*. Foram definidos dois intervalos distintos, mas em ambos o tempo total de simulação foi de 30 segundos. No primeiro foi definido um intervalo de tempo constante de 1 segundo, doravante designado intervalo de tempo 1. No

segundo, intervalo de tempo 2, foi definido um intervalo de tempo crescente como se mostra na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Intervalos de tempo usados na simulação em regime transiente – intervalo de tempo 2

Intervalo de tempo [s]	Número de repetições	Total [s]
0.01	10	0.10
0.05	18	1
0.20	10	3
0.50	10	8
1.00	22	30

4.3.1. Colina isolada

Para o intervalo de tempo 1, e com o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$, foram testadas várias velocidades do escoamento não perturbado, $U_0 = 14.0, 16.0, 18.0, 19.0$ e 20.0 m/s. Apenas para 20 m/s ocorreu variação na distribuição da velocidade de atrito. Essa variação iniciou-se apenas no instante $t = 28$ s como se mostra na Figura 4.8.

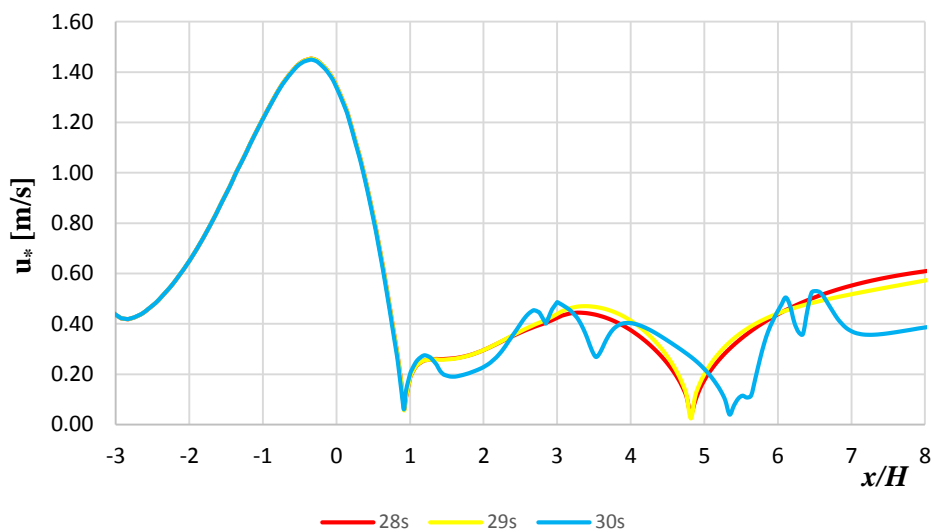


Figura 4.8. Distribuição da velocidade de atrito, ao longo do tempo, numa colina isolada para $U_0 = 20$ m/s e modelo de turbulência $\kappa\text{-}\varepsilon$ – intervalo de tempo 1.

Para o intervalo de tempo 2, e com o modelo $\kappa\text{-}\varepsilon$, foram testadas as velocidades do escoamento não perturbado $U_0 = 1.0, 8.3, 10.0, 11.0, 12.0, 14.0$ e 20.0 m/s. Para este intervalo de tempo as variações na distribuição da velocidade de atrito iniciam-se para $U_0 = 10$ m/s.

Dada a extensão dos resultados apenas se apresenta o caso de $U_0 = 20$ m/s (ver Figura 4.9). Para esta velocidade a variação na distribuição da velocidade de atrito inicia-se aos 11 s.

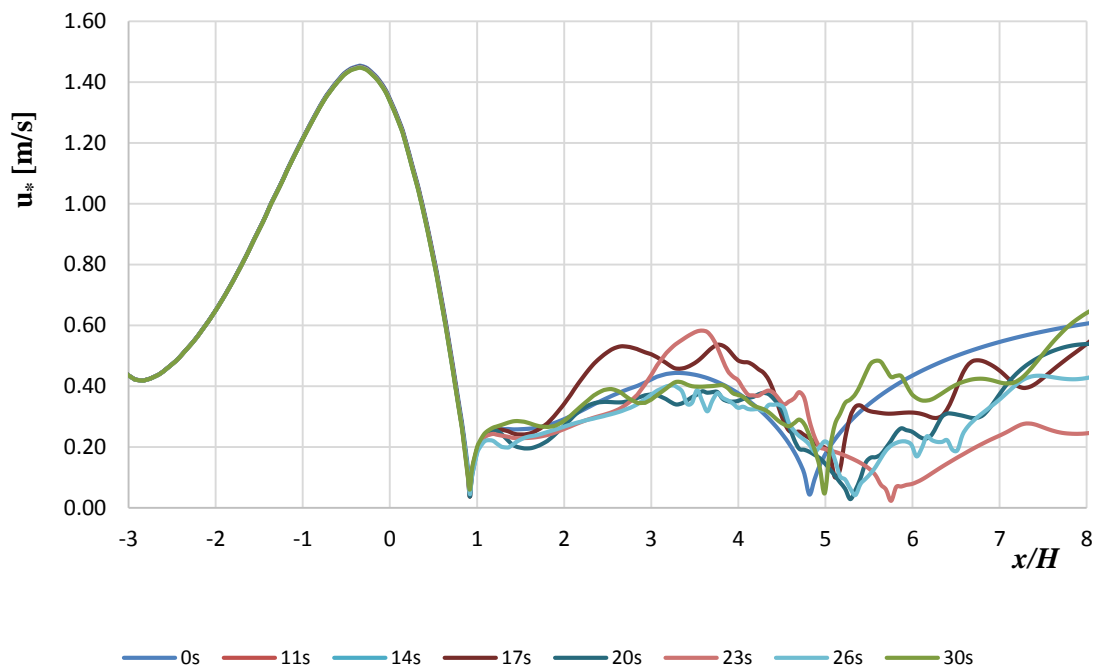


Figura 4.9. Distribuição da velocidade de atrito, para diversos instantes, numa colina isolada, para $U_0 = 20$ m/s e modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ – intervalo de tempo 2.

Na Figura 4.10 analisa-se a variação da velocidade de atrito com o tempo para um ponto próximo do de recolamento e $U_0 = 20$ m/s. Até $t = 10$ s a velocidade de atrito permanece praticamente constante. Entre os instantes $t = 11$ e 16 s há uma variação brusca da velocidade de atrito, cuja oscilação diminui entre os 16 e os 26 s. Entre os 26 e os 30 s, a variação é bastante grande, atingindo o máximo aos 27 s.

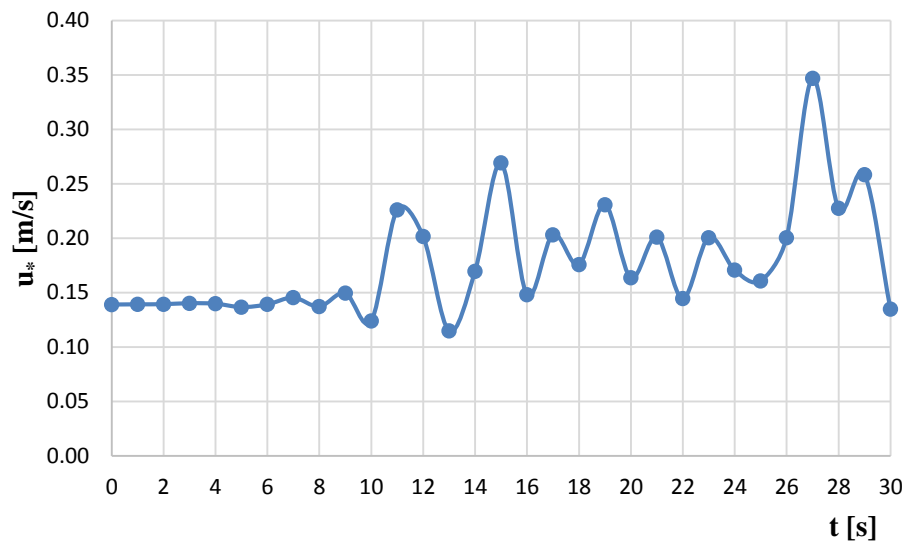


Figura 4.10. Variação da velocidade de atrito, ao longo do tempo, numa colina isolada, no ponto $x/H= 4.93$, para $U_0= 20$ m/s – intervalo de tempo 2.

Na Figura 4.11 destaca-se outro factor importante nas simulações em regime transiente: a velocidade do escoamento não perturbado. De facto, para uma velocidade do escoamento não perturbado maior, a variação da distribuição da velocidade de atrito inicia-se mais cedo.

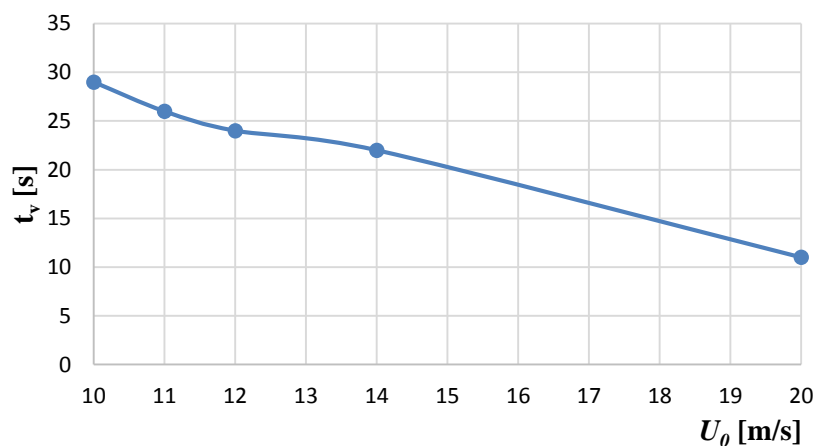


Figura 4.11. Instante a partir do qual há variação da velocidade de atrito com o tempo – intervalo de tempo 2.

Para o intervalo de tempo 2 foi ainda testado, para $U_0 = 20$ m/s, o modelo de turbulência *SSG Reynolds Stress*. A simulação realizada não convergiu, pelo que não é possível inferir a influência do modelo de turbulência.

4.3.2. Colinas dispostas em *tandem*

Para esta configuração foram estudadas velocidades do escoamento não perturbado entre 11 e 20 m/s. Em nenhuma das simulações houve variação da distribuição da velocidade de atrito com o tempo.

5. CONCLUSÕES

Na primeira secção do capítulo 4 foi estudado, para a colina isolada e para as colinas dispostas em *tandem*, a influência do modelo de turbulência adoptado na distribuição da velocidade de atrito. Constatou-se que, embora haja semelhanças de resultados entre alguns dos modelos de turbulência utilizados, a escolha deste afecta os resultados, devendo por isso ser objecto de uma selecção cuidada. A partir da comparação dos resultados numéricos com os valores experimentais não foi possível obter qualquer conclusão definitiva, visto que os segundos eram insuficientes.

Na segunda secção pretendeu-se inferir computacionalmente, a partir dos perfis de erosão média da colina isolada obtidos experimentalmente, se a erosão cessaria a partir de algum instante de tempo. Concluiu-se que deverá ocorrer erosão para todos os instantes de tempo estudados, visto que existe sempre uma porção do domínio para a qual a relação entre a velocidade de atrito e a velocidade de atrito crítica é superior à unidade. Esta afirmação contraria outra, presente no artigo de Lopes et al. (2013), onde se conclui que a erosão devido à saltação cessa a partir dos 5 minutos, sensivelmente.

Na terceira secção teve-se por objectivo determinar se o modelo computacional tem capacidade de modelar fenómenos transientes, ou seja, de prever a libertação de vórtices no rasto da colina. Concluiu-se que o programa consegue, nalgumas situações específicas, modelar esses efeitos sendo no entanto dependente de diversos factores, nomeadamente: do intervalo de tempo considerado, do valor da velocidade do escoamento não perturbado e da configuração da colina.

Sugere-se, como trabalho futuro, a obtenção de mais dados experimentais de modo a serem comparados com alguns dos resultados numéricos obtidos. Seria interessante a construção de modelos rígidos com os diferentes perfis de erosão média referidos na secção dois do capítulo quatro e a medição da distribuição da tensão tangencial superficial e posterior comparação com os resultados computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold, R.A. 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen & Company.*
- Faria, R., Ferreira, A.D., Sismeiro, J.L., Mendes, J.C.F., & Sousa, A.C.M. 2011. Wind Tunnel and Computational Study of the Stoss Slope Effect on the Aeolian Erosion of Transverse Sand Dunes. *Aeolian Research* 3(3): 303–14.
- Farimani, A.B., Ferreira, A.D., & Sousa, A.C.M. 2011. Computational Modeling of the Wind Erosion on a Sinusoidal Pile Using a Moving Boundary Method. *Geomorphology* 130(3-4): 299–311.
- Ferreira, A.D., & Lambert, R.J. 2010. Numerical and Wind Tunnel Modeling on the Windbreak Effectiveness to Control the Aeolian Erosion of Conical Stockpiles. *Environmental Fluid Mechanics* 11(1): 61–76.
- Ferreira, A.D., & Vaz, P.A. 2004. Wind Tunnel Study of Coal Dust Release from Train Wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92(7-8): 565–77.
- Fino, M.R.D.M. 2011. Estudo Experimental Da Erosão Por Acção Do Vento de Colinas Sinusoidais Constituídas Por Um Material Granular. *Tese de Mestrado*. Universidade de Coimbra.
- Frank, A., & Kocurek, G. 1996. Toward a Model for Airflow on the Lee Side of Aeolian Dunes. *Sedimentology* 43: 451–58.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., & Lavine, A.S. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7ª edição. John Wiley & Sons, Ltd.
- Iversen, J.D., & Rasmussen, K.R. 1994. The Effect of Surface Slope on Saltation Threshold. *Sedimentology* 41: 721–28.
- Lee, S., Park, K., & Park, C. 2002. Wind Tunnel Observations About the Shelter Effect of Porous Fences on the Sand Particle Movements. *Atmospheric Environment* 36(9): 1453–63.
- Lopes, A.M.G., Oliveira, L.A., Ferreira, A.D., & J.P. Pinto. 2013. Numerical Simulation of Sand Dune Erosion. *Environmental Fluid Mechanics* 13(2): 145–68.
- McLean, S.R., & Smith, J.D. 1986. A Model for Flow over Two-Dimensional Bed Forms. *Journal of Hydraulic Engineering* 112(4): 300–317.

- Nelson, J.M., McLean, S.R., & Wolfe, S.R. 1993. Mean Flow and Turbulence Fields Over Two-Dimensional Bed Forms. *Water Resources Research* 29(12): 3935–53.
- Oliveira, L.A., & Lopes, A.G. 2010. *Mecânica Dos Fluidos*. 3ª ed. ETEP - Edições Técnicas e Profissionais. Lisboa.
- Parsons, D.R., Wiggs, G.F.S., Walker, I.J., Ferguson, R.I., & Garvey, B.G. 2004. Numerical Modelling of Airflow over an Idealised Transverse Dune. *Environmental Modelling & Software* 19(2): 153–62.
- Pinheiro, S.R. 2011. Caracterização Experimental e Computacional Da Zona de Recirculação No Rasto de Uma Colina Sujeita à Erosão Por Acção Do Vento. *Tese de Mestrado*. Universidade de Coimbra
- Pye, K., & Tsoar, H. 1990. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Dordrecht: Springer Netherlands.*
- Sismeiro, J.L.S. 2010. Estudo Da Erosão, Por Acção Do Vento, de Pilhas de Armazenamento. *Tese de Mestrado*. Universidade de Coimbra
- Sweet, M.L., & Kocurek, G. 1990. An Empirical Model of Aeolian Dune Lee-face Airflow. *Sedimentology* 37: 1023–38.
- Walker, I.J. 2000. Secondary Airflow and Sediment Transport in the Lee of Transverse Dunes. *Tese de Doutoramento*. Universidade de Guelph.*
- Walker, I.J., & Nickling, W.G. 2001. Mean Flow and Turbulence Characteristics of Simulated Airflow over Isolated and Closely Spaced Transverse Dunes. *Sedimentology*. *
- . 2002. Dynamics of Secondary Airflow and Sediment Transport over and in the Lee of Transverse Dunes. *Progress in Physical Geography* 26(1): 47–75.
- . 2003. Simulation and Measurement of Surface Shear Stress over Isolated and Closely Spaced Transverse Dunes in a Wind Tunnel. *Earth Surface Processes and Landforms* 28(10): 1111–24.
- Youssef, F., Visser, S.M., Karssenber, D., Erapul, G., Cornelis, W.M., Gabriels, D., & Poortinga, A. 2012. The Effect of Vegetation Patterns on Wind-blown Mass Transport at the Regional Scale: A Wind Tunnel Experiment. *Geomorphology* 159-160: 178–88.
- Zhang, N., Kang, J. & Lee, S. 2010. Wind Tunnel Observation on the Effect of a Porous Wind Fence on Shelter of Saltating Sand Particles. *Geomorphology* 120(3-4): 224–32.

* - As referências assinaladas não foram directamente consultadas.

6. ANEXO A

Os dados presentes neste anexo dizem respeito aos modelos usados na secção 4.2. Irão ser apresentados os estudos de independência relativos ao espaçamento e ao número de camadas de inflação. Para tal, comparar-se-ão as distribuições da velocidade de atrito obtidas. Este anexo contempla ainda os valores usados para definir a malha dos modelos finais.

6.1. Instante $t= 2$ min

Na Figura 6.1 a distribuição da velocidade de atrito, para os três espaçamentos estudados, é muito semelhante Assim, opta-se por usar a malha grosseira.

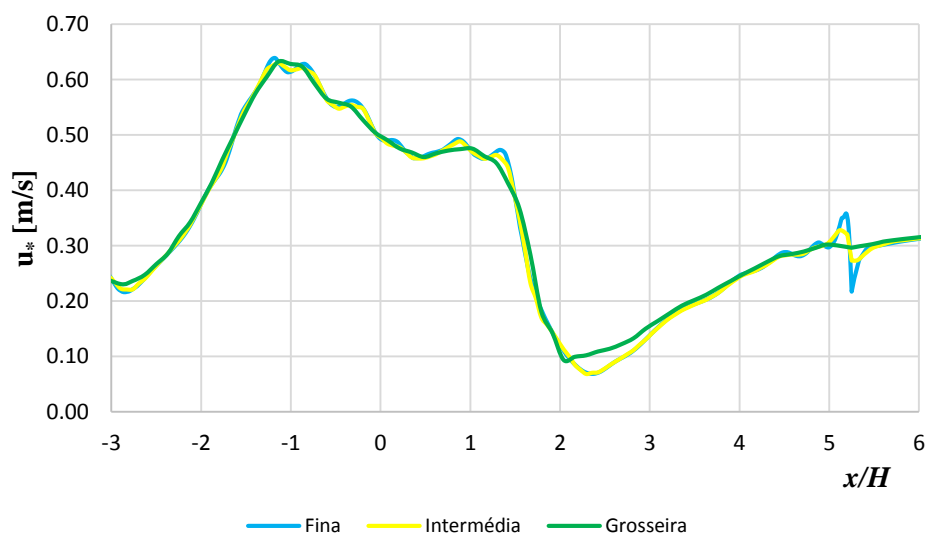


Figura 6.1. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – $t= 2$ min.

Na Figura 6.2 a distribuição da velocidade de atrito é igual quer se opte por 22 ou por 30 camadas de inflação. A diferença verificada ao usarem-se 10 camadas é pouco significativa, no entanto, opta-se pela utilização de 22 camadas para a modelação.

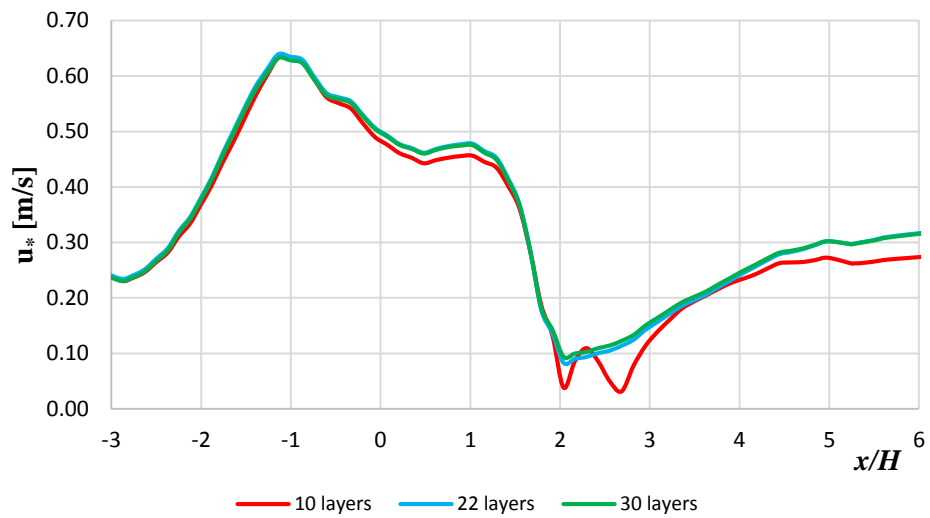


Figura 6.2. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t = 2$ min.

Na Tabela 6.1 e na Tabela 6.2 resumem-se os valores usados para a definição da malha e da camada de inflação, respectivamente.

Tabela 6.1. Parâmetros usados para a geração da malha – $t = 2$ min.

	Body spacing	Option	Geral	Base
Spacing	Face spacing	Maximum spacing [mm]	30	-
		Angular resolution [degrees]	30	18
		Minimum edge length [mm]	15	10
		Maximum edge length [mm]	30	15
		Radius of influence [degrees]	-	0
		Expansion factor	-	1.2

Tabela 6.2. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – $t= 2$ min.

	Option	Base
Inflation	Number of inflated layers	22
	Expansion factor	1.1
	Minimum internal angle [degrees]	2.5
	Minimum external angle [degrees]	10
	Define first layer by	First layer thickness
	y^+	11
	Reynolds number	34426
	Reference length [mm]	60
	First prism height [mm]	0.36 (aprox.)
	Extended layer growth	Yes
	Layer by layer smoothing	No

6.2. Instante $t= 4$ min

Na Figura 6.3 a distribuição da velocidade de atrito, para os três espaçamentos estudados, é muito semelhante. Assim, opta-se por usar a malha grosseira.

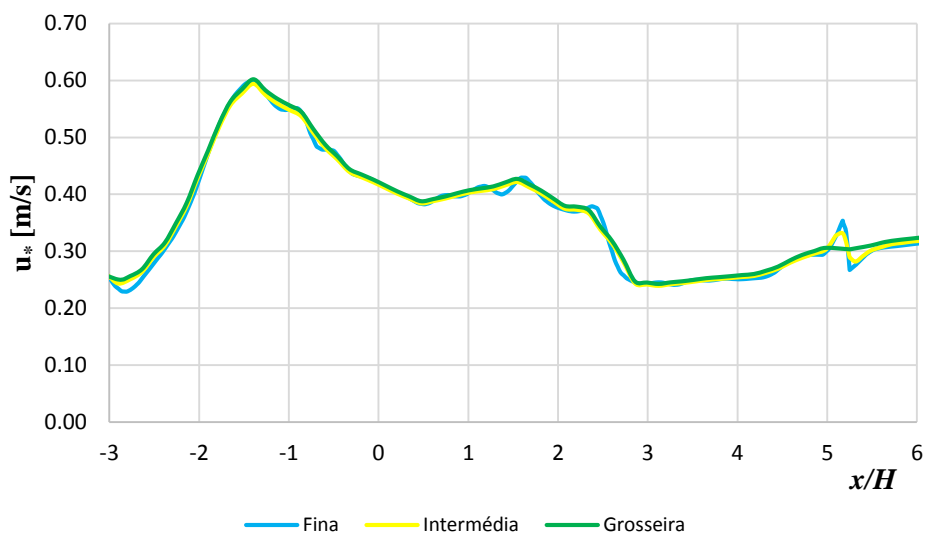


Figura 6.3. Teste de independência relativamente ao espaçamento de malha – $t= 4$ min.

Na Figura 6.4 a distribuição da velocidade de atrito é muito semelhante quer se opte por 20 ou por 30 camadas de inflação. A diferença verificada ao usarem-se 10 camadas é pouco significativa, no entanto, e para manter a coerência com o instante de tempo $t=2$ min, opta-se pela utilização de 20 camadas no modelo final.

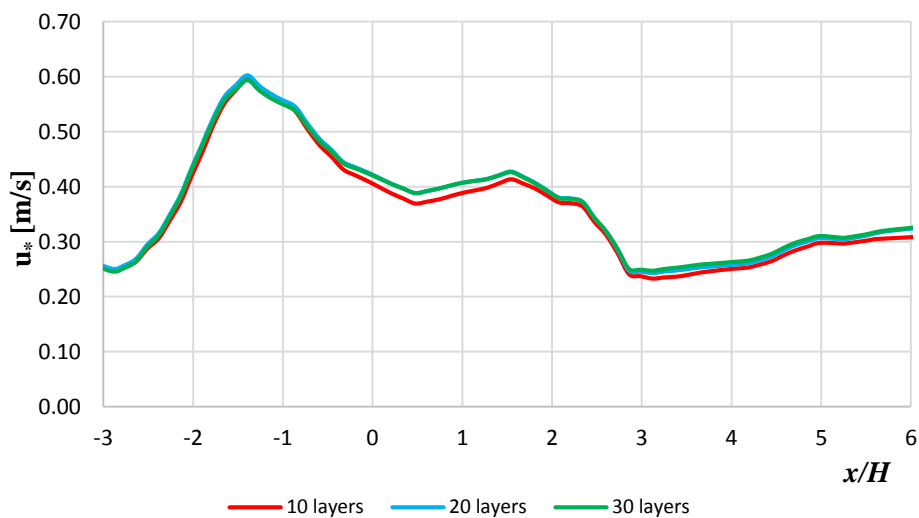


Figura 6.4. Teste de independência relativamente ao número de camadas de inflação – $t= 4$ min.

Na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4 resumem-se os valores usados para a definição da malha e da camada de inflação, respectivamente. Estes valores foram também usados para definir as malhas para os instantes $t= 6, 8, 10$ e 12 min.

Tabela 6.3. Parâmetros usados para a geração da malha – $t= 4, 6, 8, 10$ e 12 min.

	Body spacing	Option	Geral	Base
Spacing	Face spacing	Maximum spacing [mm]	30	-
		Angular resolution [degrees]	30	18
		Minimum edge length [mm]	15	10
		Maximum edge length [mm]	30	15
		Radius of influence [degrees]	-	0
		Expansion factor	-	1.2

Tabela 6.4. Parâmetros usados na geração da camada de inflação – t= 4, 6, 8, 10 e 12 min.

	Option	Base
Inflation	Number of inflated layers	20
	Expansion factor	1.1
	Minimum internal angle [degrees]	2.5
	Minimum external angle [degrees]	10
	Define first layer by	First layer thickness
	y^+	11
	Reynolds number	34426
	Reference length [mm]	60
	First prism height [mm]	0.36 (aprox.)
	Extended layer growth	Yes
	Layer by layer smoothing	No

Dado que a inclusão dos estudos de independência de malha relativamente aos instantes t=6, 8, 10 e 12 min não iria acrescentar nova informação, opta-se por não os incluir.