



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização experimental e computacional da zona de recirculação no rasto de uma colina sujeita à erosão por acção do vento

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

Autor

Sérgio Rodrigues do Pinheiro

Orientador

Professor Doutor Almerindo Ferreira Domingues

Júri

Presidente: Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Vogal: Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes

Coimbra, Julho 2011

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e o meu agradecimento. Embora seja impossível agradecer a todos que contribuíram de uma forma directa ou indirecta para a realização deste trabalho, gostava de agradecer em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pela dedicação na orientação, paciência, disponibilidade constante, pela contínua motivação para conseguir os objectivos e acima de tudo por ter acreditado em mim. Um professor exemplar e de referência.

A todos os meus colegas e amigos pelo apoio, encorajamento e os bons momentos passados ao longo do meu percurso académico.

À minha família, especialmente à minha mãe e irmã, por todo o apoio incondicional, pela formação que me proporcionaram e pelos sacrifícios que tiveram que passar para eu poder chegar a este ponto.

Ao Senhor Cardoso e ao Senhor Victor pela ajuda na construção das colinas.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

Apresenta-se um estudo da caracterização experimental e computacional do escoamento na zona de recirculação no rasto de uma colina sujeita à erosão por acção do vento. O trabalho refere-se à realização de ensaios laboratoriais efectuados em túnel aerodinâmico, e a simulação numérica executada com o programa de modelação computacional *CFX*.

Os modelos das colinas estudadas são descritos por uma equação sinusoidal, tendo-se realizado ensaios para o caso de uma colina isolada ou disposta em tandem com uma segunda similar para diferentes velocidades do escoamento não perturbado, 8.3 e 9.1 m/s. Para a interacção entre colinas estudaram-se várias distâncias entre estas, 0 e H , sendo H a altura da colina.

As colinas foram equipadas com sondas de medição da tensão tangencial, a partir das quais foi possível obter a distribuição deste parâmetro, ao longo da sua superfície.

Com a colocação de fios de lã ao longo da colina e a jusante desta estuda-se a topologia do escoamento. Estes ensaios permitiram a medir a localização do ponto de separação e recolamento do escoamento. Mediante a utilização de uma sonda de sete furos foi possível estudar a estrutura da zona de recirculação e o perfil de velocidade em torno da colina.

Para a simulação numérica foram feitos testes de independência de malha, e o estudo da sensibilidade de vários parâmetros que influenciam o escoamento em torno da colina. Uma vez realizadas as simulações compararam-se os resultados obtidos com os dados experimentais.

Constata-se de uma forma geral, uma boa concordância entre os resultados obtidos experimentalmente e os computacionais.

Palavras-chave: Colina, Tensão tangencial, Zona de recirculação, Separação, Recolamento, Simulação numérica

Abstract

A study of experimental and computational characterization of the recirculation zone in the wake of a hill subject to erosion by wind action is presented. This work refers to laboratory tests performed in a wind tunnel and numerical simulation carried out using *CFX*.

The models are described by a sinusoidal equation, and the tests were made for the case of an isolated hill and the case of a hill in tandem with a second similar hill. Two distances between hills were studied, 0 and H , where H is the height of the hill. Different undisturbed flow velocities were also studied, respectively 8.3 and 9.1 m/s.

The hills were equipped with wall-shear stress probes that allowed the wall-shear stress' distribution on the hill's surface to be obtained.

Yarns of wool were placed over the hill and downstream to study the topography of the flow. These tests allowed the measurement of the separation and reattachment points. By using a seven-hole probe it was possible to study the structure of the recirculation zone and measure the mean velocity profile around the hill.

For numerical simulation several tests of mesh independence were made. The sensitivities of several parameters that influence the flow around the hill were also studied. Numerical results were compared with experimental data and in general a good agreement was shown.

Keywords Hill, Wall shear stress, Recirculation zone, Separation, Reattachment, Numerical simulation

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Pesquisa Bibliográfica	3
2. Fundamentação teórica.....	7
2.1. Camada limite atmosférica	7
2.1.1. Influência da alteração da topografia na camada limite	8
3. Dispositivo Experimental	10
3.1. Colinas estudadas.....	10
3.1.1. Construção das colinas	11
3.2. Túnel aerodinâmico	14
3.3. Equipamento de medida.....	14
3.4. Metodologia de trabalho	16
3.5. Tratamento de dados	18
4. Simulação numérica	19
4.1. Geometria.....	19
4.2. Geração da malha.....	20
4.3. Pré-Processamento	22
4.3.1. Domínio	23
4.3.2. Modelo de turbulência	23
4.3.3. Condições de fronteira.....	23
4.4. Resolução das equações.....	26
4.5. Pós-Processamento	26
5. Apresentação e discussão dos resultados.....	27
5.1. Testes de refinamento da malha.....	27
5.1.1. Domínio de cálculo da simulação.....	28
5.1.2. Espaçamento	29
5.1.3. Número de camadas da <i>inflation layer</i>	30
5.2. Influência da rugosidade na previsão computacional do coeficiente de atrito	31
5.3. Distribuição do coeficiente de atrito para o modelo de comprimento $5H$	32
5.4. Distribuição do coeficiente de atrito para o modelo de comprimento $6H$	36
5.5. Influência da rugosidade superficial na distribuição do coeficiente de atrito – análise experimental	40
5.6. Medição do campo de velocidade em torno da colina.....	41
5.6.1. Modelo de comprimento $5H$	42
5.6.2. Modelo de comprimento $6H$	43
5.7. Localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento	44
5.7.1. Modelo de comprimento $5H$	45
5.7.2. Modelo de comprimento $6H$	46

6.	Conclusões.....	49
7.	Referências bibliográficas	51
8.	Comparação da topologia do escoamento em torno de uma ou mais colinas	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento do perfil de velocidade sobre colinas. (adaptada de Stangroom, 2004)	9
Figura 2 - Perfil das colinas estudadas.	10
Figura 3 - Representação esquemática da colina de comprimento $5H$ e sistema de eixos adoptado.	11
Figura 4 - Placas de madeira utilizadas na construção das colinas (à esquerda), colina construída, modelo $6H$ (à direita).	11
Figura 5 - Posição das sondas de medição da tensão tangencial no modelo de comprimento $5H$ (em cima) e $6H$ (em baixo), [mm]. escoamento da esquerda para a direita.....	12
Figura 6 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina não instrumentada de comprimento $5H$	13
Figura 7 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina instrumentada de comprimento $5H$	13
Figura 8 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina não instrumentada de comprimento $6H$	13
Figura 9 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina instrumentada de comprimento $6H$	13
Figura 10 - Geometria adoptada para a construção das sondas de medição da tensão tangencial. (Adaptada de Ferreira, 1993).	14
Figura 11 - Representação esquemática da sonda de 7 furos e sistema de eixos utilizado. (retirado de Silva et al. 2003).	15
Figura 12 - Representação esquemática do sistema de controlo e aquisição de dados.	16
Figura 13 - Dimensões do domínio utilizado, para a realização das simulações computacionais.	20
Figura 14 - Regiões do domínio de cálculo.	21
Figura 15 - Comparação do perfil teórico e experimental para duas velocidades do escoamento não perturbado estudadas, 8.3 e 9.1 m/s.	25
Figura 16 - Representação esquemática de duas colinas dispostas em tandem e o sistema de eixos adoptado.	27
Figura 17 - Influência do domínio de cálculo na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado.	28
Figura 18 - Malhas utilizadas para verificar a sensibilidade do parâmetro espaçamento. A- malha grosseira; B - malha intermédia; C- malha refinada.	29
Figura 19 - Influência do espaçamento na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$	29
Figura 20 - Influência do número de <i>inflation layers</i> na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$	30
Figura 21 - Influência da rugosidade na distribuição do coeficiente de atrito na superfície do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s.	31
Figura 22 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $5H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_t	32

Figura 23 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $5H$ isolada, para $U_0= 9.1$ m/s, para diferentes valores de x_f	33
Figura 24 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $5H$ isolado respectivamente para um valor $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s.	34
Figura 25 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares com comprimento $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas nula, $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s.	35
Figura 26 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares com comprimento $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H e $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s.	35
Figura 27 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0= 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_f	37
Figura 28 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0= 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_f	37
Figura 29 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0=8.3$ e 9.1 m/s.....	38
Figura 30 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares dispostas em tandem, com comprimento $6H$, para uma distância entre colinas nula, $U_0=8.3$ e 9.1 m/s.....	39
Figura 31 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares dispostas em tandem, com comprimento $6H$, para uma distância entre colinas H e $U_0=8.3$ e 9.1 m/s.	39
Figura 32 - Comparação da distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo $5H$ isolada para diferentes casos de rugosidade, com $U_0= 9.1$ m/s.	41
Figura 33 - Comparação da distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo $6H$ isolada para diferentes casos de rugosidade, com $U_0= 9.1$ m/s.	41
Figura 34 - Representação vectorial da evolução da forma do perfil de velocidade no rasto do modelo de comprimento $5H$ isolado.....	42
Figura 35 - Representação vectorial do campo de velocidade no rasto do modelo de comprimento $6H$ isolado.	43
Figura 36 - Representação vectorial do campo de velocidade ao longo de duas colinas $6H$ similares para uma distância nula entre colinas.....	43
Figura 37 - Representação vectorial do campo de velocidade ao longo de duas colinas $6H$ similares para uma distância H entre colinas.....	44
Figura 38 - Representação ilustrativa do escoamento em torno do modelo $5H$ isolado, para uma velocidade $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.	53
Figura 39 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de o modelo $5H$ isolado, para uma velocidade $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã....	54
Figura 40 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.	54
Figura 41 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas nula, $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.	55
Figura 42 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã	55

Figura 43 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.	56
Figura 44 - Representação ilustrativa do escoamento em torno do modelo $6H$ isolado, para uma velocidade $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.	56
Figura 45 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de o modelo $6H$ isolado, para uma velocidade $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã....	57
Figura 46 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.	57
Figura 47 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.	58
Figura 48 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0= 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.	58
Figura 49 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0= 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a geração da malha.	21
Tabela 2 – Características do domínio do fluido.	23
Tabela 3 – Características das condições de fronteira na saída.	24
Tabela 4 – Características das condições de fronteira na entrada.	24
Tabela 5 – Características das condições no topo.	25
Tabela 6 – Características das condições de fronteira da base.	25
Tabela 7 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para o modelo de comprimento $5H$ isolado.	45
Tabela 8 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento, para duas colinas similares de comprimento $5H$ colocadas a diferentes distâncias.	46
Tabela 9 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para o modelo de comprimento $6H$ isolado.	47
Tabela 10 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para duas colinas similares de comprimento $6H$ colocadas a diferentes distâncias.	48

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

C_f – Coeficiente de atrito	
C_μ – Constante do modelo de turbulência K- ϵ	
d – Diâmetro do grão de areia	[m]
H – Altura da colina	[m]
L – Comprimento da colina	[m]
K_s – Rugosidade superficial equivalente	[m]
K - Energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
Re – Número de Reynolds	
u – Componente média longitudinal da velocidade	[m/s]
U_0 – Velocidade do escoamento não perturbado	[m/s]
x_t – Distância desde o início da câmara de trabalho até ao centro da colina, segundo a direcção do escoamento	[m]
x_1 – Abcissa no modelo, com origem definido no centro da colina	[m]
z – Coordenada vertical	[m]
z_0 – Parâmetro de rugosidade	[m]
α – Expoente da lei da potência	
δ – Espessura da camada limite	[m]
ρ – Massa volúmica	[kg/m ³]
τ_w – Tensão tangencial	[Pa]
Δp – Diferença de pressão estática entre dois pontos da sonda para medição da tensão tangencial	[Pa]
Δu – Acréscimo da velocidade instantânea produzido pela presença de um obstáculo	[m/s]
μ – Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
ν – Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]

Siglas

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

CFD – Computational Fluid Dynamics

1. INTRODUÇÃO

A elaboração do presente trabalho para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica apresenta como tema: Caracterização experimental e computacional da zona de recirculação no rasto de uma colina sujeita à erosão por acção do vento.

A superfície do planeta Terra é caracterizada por diferentes tipos de obstáculos e de orografia, tanto naturais como artificiais. As escalas de comprimento correspondentes a esses obstáculos são bastante variadas, abrangendo as diversas edificações construídas pelo homem, as pequenas colinas isoladas, as complexas cadeias de vale e montanha e as mais altas cordilheiras.

A interacção do vento com as irregularidades da superfície terrestre, em particular com as colinas, causa mudanças no regime de vento local, originando situações cujo estudo se manifesta bastante complicado dado o carácter turbulento e tridimensional do escoamento, na maior parte dos casos. O estudo deste tipo de escoamentos é complexo devido à quantidade de parâmetros que devem ser tidos em conta, tais como as características do vento, a geometria das colinas, as alterações da superfície, entre outros.

Inúmeras são as situações nas quais seria desejável compreender o comportamento do vento em determinadas regiões. Motivos de ordem humanitária e económica podem ser referidos como exemplos. Ao longo dos anos os diversos estudos sobre o escoamento em torno de colinas que têm sido realizados são motivados essencialmente por razões económicas.

A utilização desmesurada de combustíveis fósseis obrigou a repensar a forma como a Humanidade utiliza os recursos energéticos, para suprimir as suas necessidades. Em particular a energia eólica constitui, actualmente, uma importante fonte de energia. A localização dos sistemas de conversão da energia eólica é uma questão importante que deve ser colocada, assim como a fixação de estruturas preferencialmente construídas e posicionadas no topo de colinas, tais como torres de transmissão de energia e antenas. O conhecimento do escoamento em torno de colinas pode ajudar significativamente a responder a essas questões.

O conhecimento e previsão do comportamento do vento revela-se ainda bastante relevante em estudos de dispersão e deposição de poluentes, por forma a evitar danos na agricultura provocados pelo vento, maior segurança na aviação, previsão do comportamento de um incêndio, e sobre os diversos fenómenos físicos.

No domínio da meteorologia, o interesse no conhecimento do vento reside na validação de modelos numéricos que sejam precisos para a previsão do tempo nas escalas mesoescala, microescala, e para a previsão do clima em grande escala. De facto, com o avanço da tecnologia, já é possível obter, de forma expedita, dados que possibilitam a previsão, com algum rigor, da circulação do vento a algumas centenas de metros de altura. Junto ao solo a previsão é mais complicada e menos precisa.

Com a realização do presente trabalho pretende-se caracterizar o escoamento em torno de colinas bidimensionais cujo perfil inicial é descrito por uma equação sinusoidal. Estudou-se o caso de uma colina isolada, bem como duas colinas dispostas em tandem colocadas a diferentes distâncias entre si.

Experimentalmente propõe-se como objectivos a cumprir a obtenção da distribuição da tensão tangencial na superfície das colinas, medição dos pontos de separação e recolamento do escoamento, e caracterização do campo de velocidades no rasto das colinas. Partindo das medições referidas anteriormente pretende-se validar os resultados obtidos por via da modelação computacional, sendo esse o principal objectivo proposto neste trabalho.

A motivação para a realização deste estudo resultou da necessidade de prever a erosão eólica de uma duna constituída por um material granular (areia) e analisar a influência da velocidade de atrito, e da direcção de incidência do escoamento, no fenómeno da erosão.

Este trabalho encontra-se dividido em seis partes. O presente capítulo apresenta uma primeira parte em que se faz uma abordagem geral do tema e uma segunda parte referente à pesquisa bibliográfica. Na pesquisa efectuada foi abordada paralelamente o método experimental e computacional, de forma a uma melhor compreensão do problema em estudo. No segundo capítulo faz-se um breve resumo dos aspectos mais importantes para o estudo do escoamento em torno de uma colina sujeita à erosão.

O capítulo três é dedicado ao dispositivo experimental. Nesse capítulo é feita uma análise à geometria das colinas estudadas, utilizando um equipamento de medição de

distâncias (equipamento laser). Expõe-se a metodologia seguida na realização das simulações experimentais e faz-se referência às principais características da montagem experimental utilizada durante os ensaios em túnel de vento.

No capítulo quatro é explicado todo o processo relativo à modelação computacional, desde a construção do modelo ao tratamento de resultados.

O capítulo cinco é dedicado à apresentação e discussão de resultados obtidos por via experimental e numérica. Apresenta-se ainda o estudo da influência de vários parâmetros do modelo computacional que influenciam a caracterização da zona de recirculação e a distribuição da tensão tangencial.

Por fim, no capítulo seis são realçadas as conclusões mais importantes resultantes deste estudo.

1.1. Pesquisa Bibliográfica

Neste subcapítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica realizada sobre alguns assuntos relacionados com o tema da presente tese. Procurou-se abordar o tema de uma forma sintética mas, ao mesmo tempo, geral. O factor que motivou a realização desta pesquisa prendeu-se com o objectivo de conseguir uma visão, embora sumária, dos temas abordados para uma melhor compreensão do problema.

O estudo do tema apresenta-se dividido em três tipos de abordagem, analítica, experimental e computacional, sendo que a computacional tem sido cada vez mais utilizada em estudos similares ao do presente trabalho.

Os trabalhos mais importantes referentes à análise teórica de escoamentos sobre colinas são, atribuídos a Hunt e seus colaboradores. Jackson e Hunt (1975) apresentam uma solução analítica do escoamento tipo camada limite, turbulento e adiabático, sobre uma colina bidimensional, com rugosidade uniforme e de pequena elevação. Estes autores sugeriram a existência de uma estrutura de escoamento semelhante ao modelo clássico de dois pisos desenvolvido para a camada limite atmosférica. Na região interna admite-se que a estrutura do escoamento possa ser representada por meio de uma lei logarítmica. Na região externa da camada limite o escoamento poderá ser considerado como irrotacional e invíscido, visto as perturbações nas tensões serem desprezáveis.

O aumento da velocidade no topo da colina, o denominado factor “*speed-up*” foi analisado por aqueles autores, referindo que o valor máximo para este parâmetro é dado pela relação de $\frac{H}{L}$ multiplicado por um factor de 2, em que H é a altura máxima da colina e L o comprimento desta definido para metade da altura.

Esta teoria foi posteriormente estendida ao caso de topografias tridimensionais por Mason e Sykes (1979). As previsões teóricas propostas nesse trabalho foram comparadas com medições de campo realizados sobre a colina Brent Knoll, aproximadamente circular e isolada.

Hunt et al. (1988) desenvolveram mais a teoria linear proposta por Jackson e Hunt (1975), incluindo na região interna da camada limite, uma fina camada adjacente à superfície, o que permitiu resolver escoamentos incidentes com maior tensão tangencial. Foi observado que esta modificação proporciona maior generalidade de aplicação da teoria linear.

Belcher et al. (1993), estenderam a análise assintótica de Hunt et al. (1988) do escoamento tipo camada limite, turbulento, sobre uma colina bidimensional de pequena curvatura, o que permitiu estimar a primeira ordem de contribuição para o cálculo do arrasto sobre colinas. A fórmula proposta para o cálculo do coeficiente de arrasto mostrou boa concordância com estudos numéricos e experimentais em colinas com pequenos declives em que ocorria a separação do escoamento.

Os trabalhos revistos acima apresentam a desvantagem de não serem aplicáveis a colinas abruptas que possam gerar extensas regiões de recirculação. Para esses casos o problema torna-se mais complexo, devido à dificuldade de prever o comportamento da camada limite turbulenta. Este factor leva a uma quebra da validade da teoria linear.

Considerando agora a abordagem experimental, Arya et al. (1987) analisaram, em túnel de vento, o escoamento sobre colinas bidimensionais, com pequena curvatura e de diferentes formas. As quatro colinas estudadas possuíam diferentes declives, 10°, 13°, 16° e 26°, respectivamente, e foi verificado que apenas a colina com declive superior induzia separação no escoamento, com uma zona de recirculação estável.

Finnigan et al. (1990), referindo-se aos estudos realizados por Finnigan (1988), afirmam que para colinas bidimensionais, simétricas e lisas o valor mínimo do declive para que ocorra a separação do escoamento na face de jusante da colina é de aproximadamente 20°. Referem ainda que para superfícies rugosas esse valor diminui dependendo da

rugosidade da superfície, dando como exemplo o caso de uma colina com um declive de 16° , e baixa rugosidade, que apresenta uma zona de recirculação estável com extensão de $2H$.

Alguns autores argumentam que a geometria que melhor caracteriza os complexos terrenos presentes na natureza, é uma série de colinas bidimensionais dispostas em tandem e não o caso de uma colina isolada.

Gong et al. (1996) estudaram o caso de uma série de colinas com perfil sinusoidal em túnel de vento. As colinas estudadas possuíam uma elevação íngreme, com diferentes valores para o parâmetro da rugosidade superficial. Para a série de colinas em que a superfície era considerada lisa ocorreu separação do escoamento na primeira colina sendo que nas restantes o escoamento manteve-se colado à superfície. No caso da série de colinas com superfície rugosa ocorreu separação do escoamento em todas as colinas. As medições foram comparadas com valores numéricos tendo-se obtido uma boa concordância.

Kim et al. (1997) efectuaram testes em túnel de vento sobre o comportamento do escoamento sobre colinas cuja forma é dada por uma função co-seno. As colinas possuíam alturas distintas, e diferentes declives. Estes autores realizaram estudos sobre o perfil de velocidade do escoamento e caracterizaram a zona de recirculação para o caso de uma colina isolada e para duas colinas dispostas em tandem. A particularidade deste estudo centra-se no facto das colinas dispostas em tandem terem alturas distintas.

Athanassiadou e Castro (2001) realizaram ensaios do comportamento do escoamento sobre uma série de colinas com perfil sinusoidal. Foram investigadas duas séries de colinas rugosas, uma de elevação suave, com um declive de 10° , e outra íngreme com declive de 20° . A separação do escoamento só ocorreu nas colinas com inclinação abrupta confirmando assim as expectativas teóricas.

Ishihara et al. (2001), através da realização de ensaios em túnel de vento, caracterizaram a zona de recirculação do escoamento sobre uma colina bidimensional cuja forma é dada por uma equação co-seno. Efectuaram testes para diferentes valores do parâmetro da rugosidade superficial chegando à conclusão que, com o aumento da rugosidade, a zona de recirculação também aumentava.

Loureiro et al. (2006) realizaram testes em canal hidráulico do escoamento sobre uma colina bidimensional isolada, considerada lisa, para a caracterização da zona de

recirculação. Para além disso realizaram também medições da tensão tangencial na superfície da colina. Foram realizadas comparações com valores obtidos por modelação numérica e verificou-se que, numericamente, os resultados relativos à extensão da zona de recirculação são sobrestimados em relação aos obtidos experimentalmente. Para a distribuição da tensão tangencial sobre a superfície da colina os resultados apresentam uma boa concordância entre as medições experimentais e as simulações efectuadas.

Nos últimos anos tem havido uma proliferação no uso de software para modelação numérica de escoamentos em topografia complexa. Vários foram os modelos criados para a previsão do comportamento do escoamento. Estes modelos fornecem maior detalhe sobre o campo do escoamento, mas devem ser acompanhados de simulações experimentais para sua validação.

Lun et al. (2003) simularam o escoamento em torno de uma colina bidimensional testando três modelos de turbulência, nomeadamente modelo standard $K-\varepsilon$ de Launder e Spalding (1974), e duas revisões lineares propostas por Durban (1996) e Shih et al. (1995). Na caracterização da zona de recirculação o modelo que apresentava melhor comparação com as medições experimentais é o proposto por Shih et al. (1995). Lun et al. (2006) na sequência dos estudos realizados em 2003, testaram uma revisão do modelo de turbulência $K-\varepsilon$, proposto por Nagano e Hatori (2003) na simulação do escoamento em topografia complexa. Este modelo apresentou uma boa concordância com os valores obtidos experimentalmente para a zona de recirculação.

Loureiro et al. (2008) realizaram numericamente a comparação de seis modelos de turbulência no escoamento em torno de uma colina. Os resultados obtidos foram confrontados com medições efectuadas num canal hidráulico. Nas simulações realizadas foi obtida a distribuição da tensão tangencial ao longo da superfície colina, a medição dos pontos de separação e recolamento do escoamento, entre outros. Os resultados obtidos mostram que todos os modelos subestimam o comprimento da zona de recirculação. Em relação à distribuição da tensão tangencial foi verificado que, na face de jusante da colina, os resultados apresentam boa concordância com as medições experimentais. Na face de montante os resultados apresentam alguma discrepância.

Neste trabalho realiza-se um estudo, com base em testes de túnel de vento, e para a modelação numérica do escoamento será recorreu-se ao programa comercial *CFX* (*Ansys 11.0*).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica sobre alguns assuntos relacionados com o tema da presente tese. Expõe-se, de forma bastante resumida, a definição de camada limite atmosférica, tal como alguns parâmetros que a influenciam, dando particular atenção à elevação da topografia no desenvolvimento daquela.

2.1. Camada limite atmosférica

A atmosfera é uma camada de gases que cobrem a superfície da Terra, que é essencialmente composta por oxigénio, nitrogénio e partículas de suspensão. De acordo com as características da distribuição da temperatura com a altura, a atmosfera pode ser dividida nas seguintes camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera, consoante o aumento da altitude.

A parte da troposfera que sofre directamente influências da superfície do planeta é denominada de camada limite atmosférica, onde se sente o efeito do atrito e aquecimento da Terra. Esta camada tem tipicamente uma altura de 1000 m, o que representa cerca de 10% da altura da troposfera, mas o domínio de variação vai desde os 200 aos 5000 m.

No domínio da aerodinâmica é usual definir-se a espessura da camada limite como a distância vertical da superfície à altura onde a velocidade do fluido atinge 99 % do valor da velocidade do escoamento não perturbado. Esta definição é muito pouco utilizada no domínio da atmosfera, já que a forma do perfil de velocidade não tem um crescimento tão monótono e preciso como o da camada limite desenvolvida sobre uma placa plana. A direcção do vento varia com a altitude e, com a existência de ventos térmicos pode ainda tornar-se mais difícil a medição da sua espessura.

Superfícies como deserto, solo, vegetação, cidades, etc., têm diferentes propriedades físicas, tal como diferentes propriedades de radiação, capacidade térmica,

humidade e rugosidade. Estas diferenças exercem influência sobre o movimento da atmosfera e causam diferentes estratificações e condições da camada limite atmosférica.

A referida camada pode ser dividida em 3 regiões: a subcamada laminar ou viscosa, a camada superficial e a camada de atrito superior. A subcamada viscosa consiste numa fina camada junto à superfície, tipicamente com menos de 1 cm de altura, onde as trocas de calor e de outras propriedades do escoamento se dão a um nível molecular. A distância a partir desta subcamada até 50 a 100 m de altura acima da superfície da terra é a camada superficial. Esta zona é caracterizada por variações bruscas na velocidade do vento, temperatura, concentração, bem como de outras propriedades. É através desta que se dão as trocas de diversas propriedades, entre a superfície terrestre e a restante parte da camada limite atmosférica. No interior desta camada, e até sensivelmente 2 m de altura acima da superfície, a velocidade do vento é caracterizada por um perfil logarítmico, Zheng, (2009). O escoamento é fortemente influenciado pela superfície e a interferência dos factores térmicos é insignificante em comparação com factores dinâmicos.

No estudo da erosão eólica, e referindo mais em concreto o fenómeno da saltação (movimento saltitante de partículas), verifica-se que este ocorre a uma distância de sensivelmente 10 cm acima da superfície. Assim o campo de velocidade, perto do solo tem um papel crucial no movimento das partículas. Outro aspecto que influencia bastante a saltação é o escoamento em topografia não uniforme. Neste tipo de situações o estudo torna-se mais complicado, devido à complexidade dos fenómenos que ocorrem no interior da camada limite atmosférica, especialmente na camada superficial.

2.1.1. Influência da alteração da topografia na camada limite

De seguida considera-se a existência de um escoamento sobre uma zona onde se verifique a alteração da superfície. A influência deste facto sobre a camada limite é bastante complexa devido aos fenómenos que aí ocorrem, dado que se cria toda uma variedade de movimentos do fluído, envolvendo pequenas e grandes escalas, as quais interagem com a camada limite atmosférica de uma forma bastante complicada.

De seguida é mostrado um diagrama esquemático do desenvolvimento do perfil de velocidade sobre uma colina bidimensional, semelhante às estudadas neste trabalho.

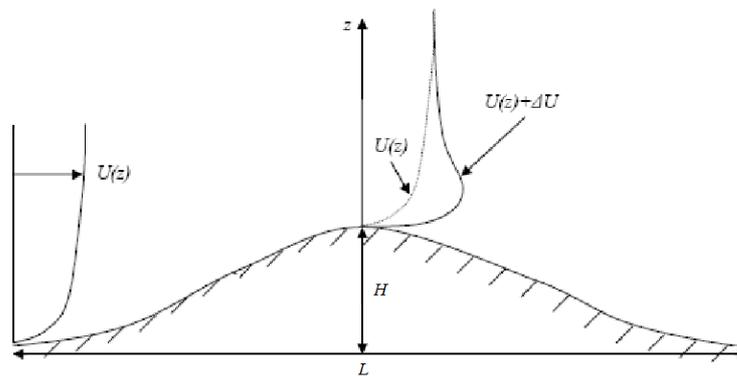


Figura 1 - Desenvolvimento do perfil de velocidade sobre colinas. (adaptada de Stangroom, 2004)

Na Figura 1 mostra-se a mudança no perfil de velocidade no topo da colina, sendo visível que o perfil de velocidade nesta zona sofre um acréscimo de velocidade (Δu). Vários autores estudaram as zonas de recirculação a montante e jusante da colina, mostrando que ocorre uma pequena desaceleração no início desta, podendo eventualmente ocorrer uma pequena zona de recirculação se a colina for bastante íngreme. O escoamento acelera até ao topo da colina onde a velocidade máxima ocorre. Na face de jusante há uma forte desaceleração do escoamento. Se o declive da colina for bastante elevado ocorre separação do escoamento formando uma zona de recirculação. A zona de separação e, conseqüente, a zona de recirculação, está directamente dependente do declive. Com o aumento do declive aumenta a zona de recirculação.

Finnigan et al. (1990), citando Finnigan (1988), afirmam que em colinas bidimensionais, simétricas e lisas, o declive mínimo para que ocorra separação na face de jusante é de aproximadamente 20° , mas que em colinas com menor declive este fenómeno pode ocorrer se a superfície for rugosa. Por exemplo no caso de uma colina com declive de 16° , com uma rugosidade de $\frac{H}{z_0} = 50$, apresenta uma zona de recirculação estável de comprimento $2H$. Em contraste com este resultado o modelo de Arya et al. (1987), com um declive de 16° e $\frac{H}{z_0} = 120$, apresentou apenas uma zona de recirculação de carácter instável, tal como o modelo de Britter et al. (1981) com um declive de 12.5° e $\frac{H}{z_0} = 500$.

Neste trabalho, os modelos estudados cuja superfície se poderá considerar quase lisa, com comprimento de $5H$ e $6H$, possuem um declive máximo respectivamente, de 32° e 27.5° , tendo-se verificado que ocorre separação do escoamento na face de jusante de ambos os modelos, confirmando assim os resultados teóricos afirmado por aqueles autores, conforme se apresentará na secção 5.7.

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Este capítulo será dedicado à apresentação do dispositivo experimental utilizado durante a realização dos ensaios experimentais. Na primeira parte apresentam-se as colinas estudadas, explica-se o processo de construção das colinas e expõem-se as principais características dos equipamentos de medida utilizados na simulação experimental, incluindo o túnel aerodinâmico. Na segunda parte será exposto a metodologia seguida na realização dos ensaios e a descrição do tratamento dos dados.

3.1. Colinas estudadas

Para caracterizar o escoamento em torno de colinas sujeitas à erosão por acção do vento, utilizaram-se dois modelos de colinas. Ambos os modelos estudados, cujo perfil está representado na Figura 2, possuem uma altura, H , de 60 mm, sendo que o seu comprimento, L , toma os valores de $5H$ (300 mm) e $6H$, (360 mm). A geometria das colinas é definida pela equação

$$z = \frac{H}{2} \left\{ 1 + \sin \left[\pi \times \left(\frac{x_1}{L/2} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

em que a altura H era fixa, variando-se o comprimento consoante o modelo desejado.

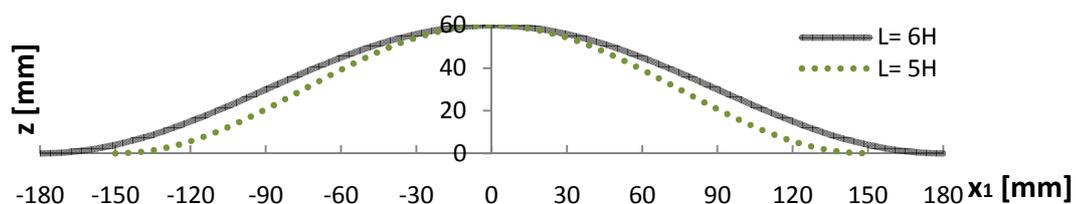


Figura 2 - Perfil das colinas estudadas.

O estudo da erosão deste tipo de colinas foi efectuado por Fino (2011). Na Figura 3 mostra-se o sistema de eixos adoptado, sendo z a direcção vertical e x_1 a direcção alinhada com o escoamento.

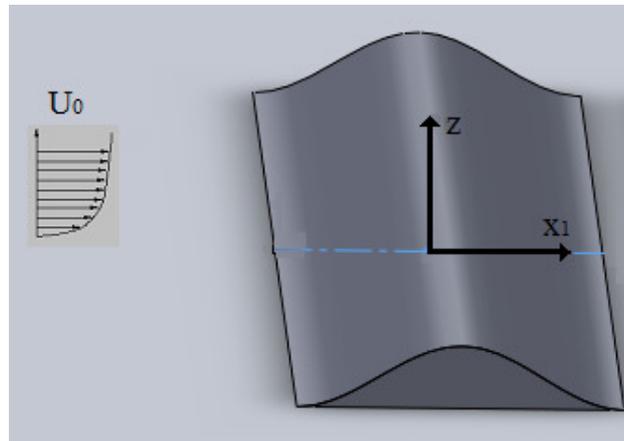


Figura 3 - Representação esquemática da colina de comprimento $5H$ e sistema de eixos adoptado.

3.1.1. Construção das colinas

Para a realização dos ensaios experimentais foram construídas quatro colinas, duas delas para o modelo cujo comprimento é $5H$ e as restantes com comprimento de $6H$ visto se pretender estudar dois tipos de configurações, nomeadamente o caso de uma colina isolada e a interacção entre colinas. For forma a poder assentar e colar uma chapa de alumínio com 0.5 mm de espessura cortaram-se quatro placas de madeira (Figura 4), com o perfil descrito pela equação (1) em função do modelo pretendido.

Inicialmente as chapas de alumínio eram consideradas com uma superfície lisa, pois possuíam um bom acabamento superficial. Na fase final do trabalho foram realizados ensaios para diferentes rugosidades da superfície.



Figura 4 - Placas de madeira utilizadas na construção das colinas (à esquerda), colina construída, modelo $6H$ (à direita).

Para a obtenção da distribuição da tensão tangencial, e de forma a podermos colocar as sondas para tal propósito, foram feitos pequenos orifícios em três linhas paralelas e alinhadas com o escoamento, no centro da colina, espaçadas de 3 mm, com 6 mm de diâmetro. Este processo foi realizado apenas em uma colina de cada modelo, sendo estas denominadas de colinas instrumentadas. As restantes serviam unicamente para o estudo da interacção entre colinas, sendo intituladas de colinas não instrumentadas. No modelo com comprimento de $5H$, colocaram-se 19 sondas, e no $6H$ o número de sondas é de 22. (ver Figura 5). As sondas usadas serão apresentadas na secção 3.3.

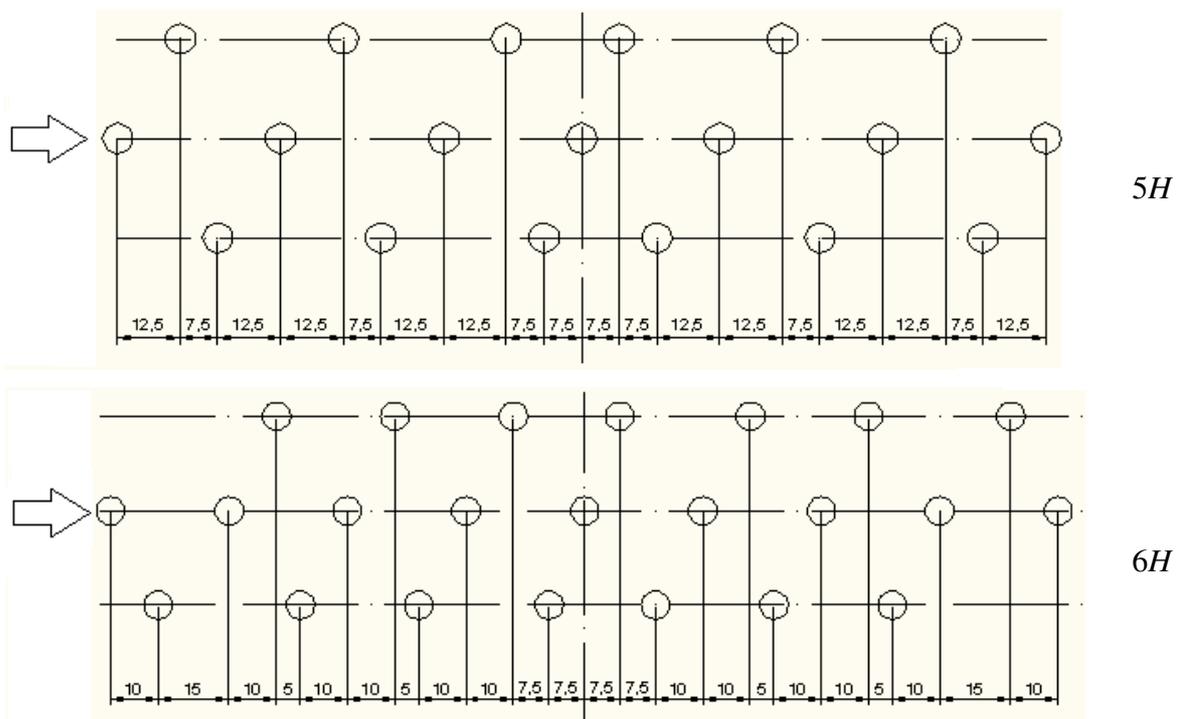


Figura 5 - Posição das sondas de medição da tensão tangencial no modelo de comprimento $5H$ (em cima) e $6H$ (em baixo), [mm]. Escoamento da esquerda para a direita.

Uma vez concluída a construção de cada colina, estas eram colocadas na câmara de ensaios do túnel aerodinâmico, onde se efectuou medições do seu perfil, ao longo da linha média, para comparação com o perfil teórico. As medições foram efectuadas por uma estação de medida, cujos principais componentes são um mecanismo de atravessamento ao qual está acoplado um sensor laser para medição de distâncias. Nas Figuras 6 a 9 apresenta-se a comparação entre o perfil teórico e o perfil real de todas as colinas construídas.

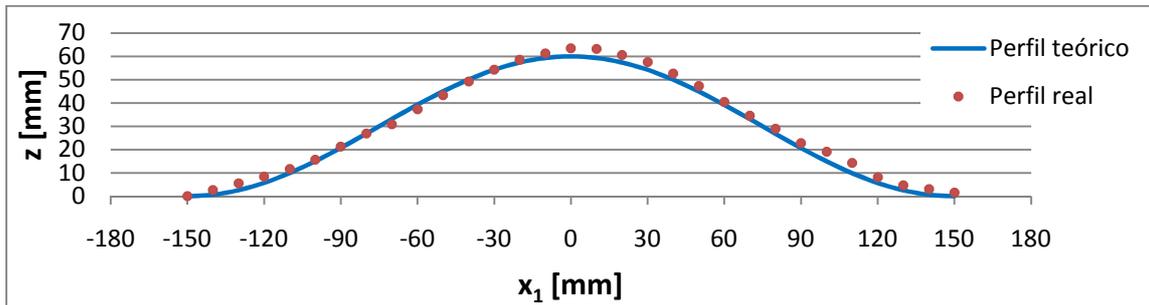


Figura 6 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina não instrumentada de comprimento 5H.

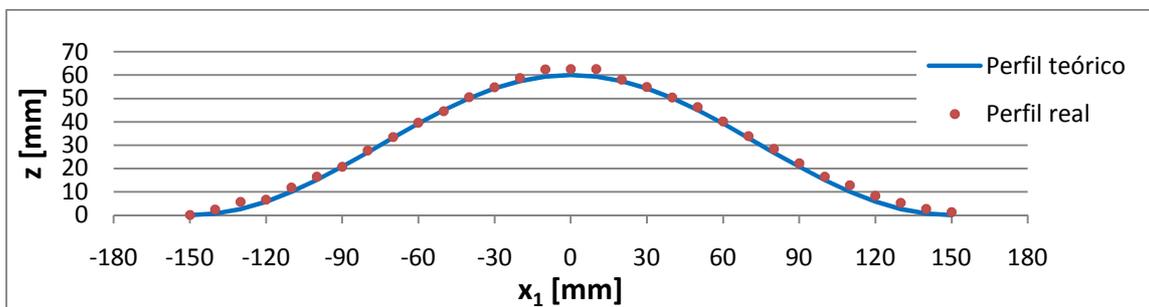


Figura 7 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina instrumentada de comprimento 5H.

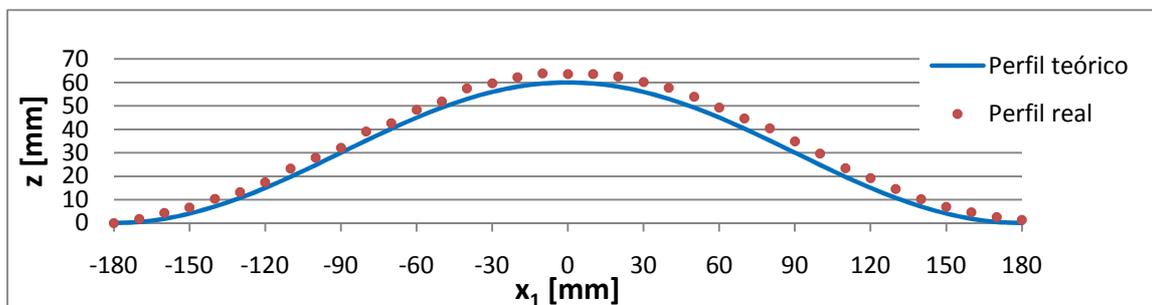


Figura 8 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina não instrumentada de comprimento 6H.

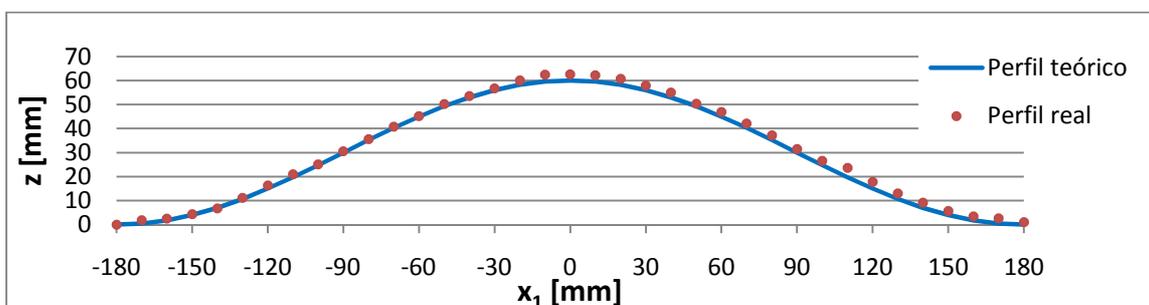


Figura 9 - Comparação entre o perfil teórico e real da colina instrumentada de comprimento 6H.

3.2. Túnel aerodinâmico

Para a realização dos ensaios, recorreu-se ao túnel aerodinâmico existente no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI). Este equipamento apresenta um bocal de saída de forma quadrada, com 2 m de lado, e dispõe de uma câmara de ensaios aberta com 5 m de comprimento. Está equipado com um ventilador radial, que é accionado por meio de um motor eléctrico com uma potência de 230 KVA. A velocidade máxima alcançável na câmara de ensaios é de, aproximadamente, 18 m/s.

3.3. Equipamento de medida

Recorreu-se a diverso equipamento de medida durante a realização dos ensaios, principalmente instrumentos de pressão. Para efectuar as medições da tensão tangencial utilizou-se um tipo de sonda idêntico ao proposto por Irwin (1981). O princípio de funcionamento da sonda baseia-se na diferença de pressão estática entre dois pontos, um situado ao nível da superfície e outro ligeiramente acima, conforme a Figura 10. Estas sondas foram construídas e calibradas por Ferreira (1993). Na Figura 10 apresentam-se as dimensões das sondas.

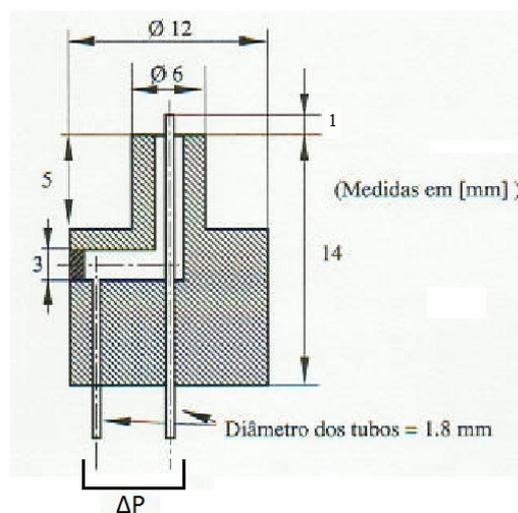


Figura 10 - Geometria adoptada para a construção das sondas de medição da tensão tangencial. (Adaptada de Ferreira, 1993).

Segundo aquele autor, a curva de calibração das sondas é dada pela seguinte expressão:

$$\tau_w = 0.0373 \times \Delta p^{0.768} \quad (2)$$

em que τ_w [N/m²] é a tensão tangencial e Δp [Pa] a diferença de pressão estática entre os dois pontos da sonda referidos anteriormente.

Para a medição do campo de velocidades utilizou-se uma sonda de 7 furos. Este tipo de sonda possui um diâmetro de 5 mm na sua parte cilíndrica e as tomadas de pressão têm 1 mm de diâmetro. O ângulo de abertura da extremidade cônica (correspondente ao ângulo aceitável de medida, definido como o ângulo que o escoamento faz com o eixo da sonda) é de 60°. Na Figura 11 mostra-se uma representação esquemática da respectiva sonda tal como do sistema de eixos utilizado.

Esta sonda foi construída e calibrada no grupo de Mecânica dos Fluidos da Universidade de Coimbra. O processo de calibração e estrutura do programa de medição utilizado encontra-se descrito em Silva et al. (2003).

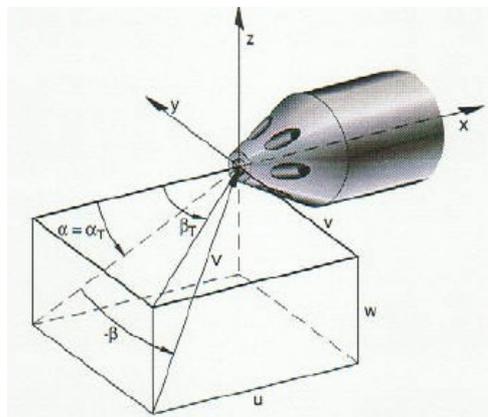


Figura 11 - Representação esquemática da sonda de 7 furos e sistema de eixos utilizado. (retirado de Silva et al. 2003).

Esta sonda foi acoplada a um mecanismo de atravessamento de forma a poder percorrer os pontos de medição pretendidos.

Para a medição da velocidade do escoamento não perturbado utilizou-se um tubo de pitot-static com um diâmetro de 6 mm. Utilizou-se uma scanivalve de 48 canais, para os casos em que existiam várias tomadas de pressão, nas quais era necessário efectuar leituras de pressão. Estas leituras foram medidas por um transdutor de pressão eléctrico da marca MULTUR.

A aquisição e leitura dos valores de pressão e o controlo do mecanismo de atravessamento foram executadas automaticamente por um computador pessoal, através de uma placa de aquisição.

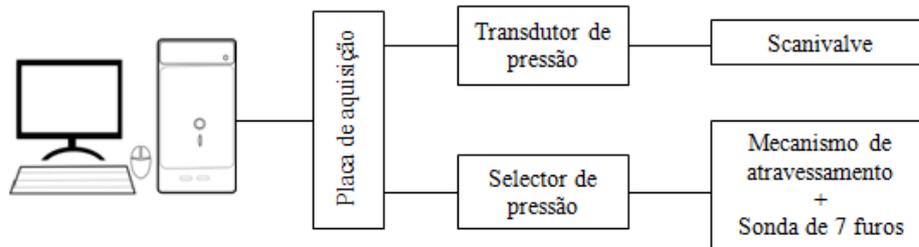


Figura 12 - Representação esquemática do sistema de controlo e aquisição de dados.

3.4. Metodologia de trabalho

Na primeira parte desta secção será exposta a metodologia para a obtenção da tensão tangencial, e caracterização da topologia do escoamento. Na segunda parte descrevem-se os ensaios realizados com a sonda de 7 furos, para a medição do campo de velocidade.

Obtenção da distribuição da tensão tangencial ao longo da colina e caracterização da topologia do escoamento

O protocolo de ensaio exposto de seguida é para o caso de uma colina isolada. No estudo da interacção de colinas o protocolo seguido possui os mesmos cânones.

- 1- Colocar as sondas de medição da tensão tangencial na colina.
- 2- Conectar todo o equipamento de medida necessário à realização do ensaio (ver Figura 12).
- 3- Colocar e fixar a colina instrumentada na câmara de ensaios do túnel aerodinâmico.
- 4- Na aplicação elaborada em TESTPOINT, definir os parâmetros para o ensaio, que neste caso serão uma frequência de aquisição de 50 Hz, e uma dimensão de 750 pontos para a amostra recolhida em cada medição

efectuada. O limite superior e inferior dos canais a utilizar pela scanivalve varia consoante o modelo a estudar.

- 5- Ligar o túnel de vento e regular a velocidade do escoamento não perturbado (U_0) na câmara de ensaios desejada (8.3 ou 9.1 m/s).
- 6- Na aplicação elaborada em TESTPOINT, dar início às medições de pressão em cada sonda e no tubo de pitot.

A metodologia para a caracterização da topologia do escoamento consistiu na colocação de fios de lã na superfície dos modelos e a jusante destes. Os fios foram colocados a uma distância de 15 cm da linha média do modelo, em duas linhas paralelas distantes 3 cm uma da outra e espaçados de 3 cm. Pela análise do movimento destes e da sua orientação foi possível identificar de forma aproximada, a localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento.

Medição do campo de velocidade em torno da colina

O protocolo seguido nos ensaios foi o seguinte:

- 1- Acoplar a sonda de 7 furos ao mecanismo de atravessamento (as diferentes tomadas de pressão já se encontravam ligadas a um selector de pressão).
- 2- Ligar o selector de pressão à placa de aquisição e conectar esta ao computador.
(Estes passos foram efectuados apenas para a realização do primeiro ensaio.)
- 3- Colocar e fixar a colina (ou colinas) na câmara de ensaios do túnel aerodinâmico.
- 4- Na aplicação elaborada em TESTPOINT, configurar o selector de pressão. Verificar a comunicação, fazer um “reset” a todos os canais e definir os parâmetros de aquisição de dados. Neste caso optou-se por um tempo de aquisição em cada ponto de 15 s e 225 amostras por canal em cada aquisição.
- 5- Ainda na mesma aplicação, definiram-se os pontos em que seriam efectuadas as medições consoante a configuração a estudar.

- 6- Ligar o túnel aerodinâmico, e regular a velocidade do escoamento não perturbado (U_0) para 8.3 m/s (única velocidade estudada).
- 7- Na aplicação elaborada em TESTPOINT, dar início às medições efectuadas com a sonda de 7 furos.

3.5. Tratamento de dados

Uma vez adquiridos os dados referentes à distribuição da tensão tangencial utilizam-se esses dados para calcular o coeficiente de atrito (C_f) definido por:

$$C_f = \frac{|\tau_w|}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (3)$$

em que τ_w representa a tensão tangencial na superfície da colina, a qual depende do gradiente de velocidade na região parietal, habitualmente definida por:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{du}{dz} \right)_{z=0} \quad (4)$$

onde μ representa a viscosidade dinâmica do fluido. Na equação (3), coloca-se um sinal de módulo na tensão tangencial pois o tipo de sondas utilizado não fornece qualquer indicação do sentido do escoamento.

Para a medição do campo de velocidade, e uma vez obtidos os valores de pressão, utilizou-se um programa de software, intitulado *TRAT7F*, que fazia a conversão dos valores adquiridos em velocidade, para posteriormente serem manipulados no programa Tecplot 360 usado para representar o campo de velocidade em torno da colina.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo apresenta-se a descrição dos procedimentos efectuados para a realização das simulações computacionais. Estas foram executadas no programa comercial de modelação numérica *CFX Ansys* versão 11.0.

A metodologia seguida na resolução do problema em estudo foi a seguinte:

- Construção da geometria,
- Geração da malha, *Meshing*
- Pré-Processamento, *CFX-Pre*
- Resolução das equações, *CFX-Solver*
- Pós-Processamento, *CFX-Post*

4.1. Geometria

Esta etapa refere-se ao desenho dos modelos estudados. Para esse efeito recorreu-se a outro software, Solidworks. Inicialmente o domínio do escoamento possuía as seguintes dimensões $10H$ de altura, $5H$ de comprimento a montante da colina (distância desde o início do domínio até ao início da colina) e $20H$, a jusante da colina (distância do final da colina até ao final do domínio). Foram realizados testes com diferentes extensões do domínio e verificou-se que a tensão tangencial na superfície da colina variava com o aumento deste, até determinado comprimento. Chegou-se à conclusão que o domínio que melhor se adequava à resolução do nosso problema teria as seguintes dimensões: $10H$ de altura, $20H$ de comprimento a montante da colina e $30H$ a jusante da colina (ver Figura 13). Os resultados da distribuição do coeficiente de atrito com a variação do domínio do escoamento serão apresentados no capítulo 5.

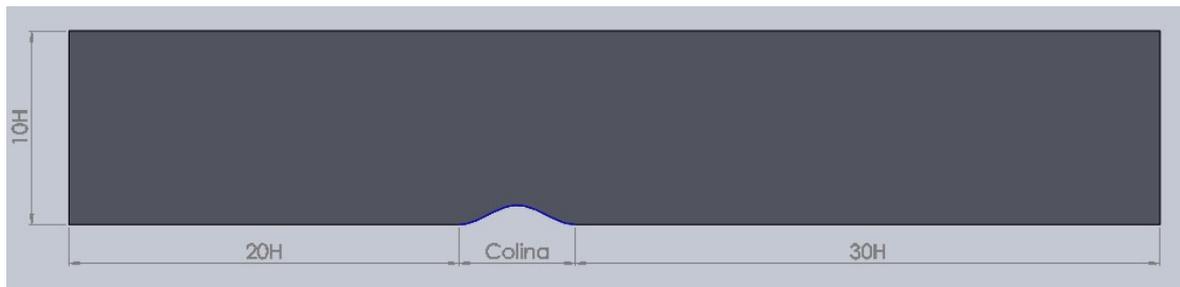


Figura 13 - Dimensões do domínio utilizado, para a realização das simulações computacionais.

4.2. Geração da malha

A geração de uma malha baseia-se na divisão do domínio de cálculo do escoamento em volumes bastantes pequenos, para que as equações inerentes ao escoamento, sejam discretizadas nestes elementos. Para cada problema físico a estudar, a geração de uma malha tem associados vários parâmetros que devem assumir diferentes valores, como por exemplo o tipo de escoamento, a geometria do escoamento, o fluido em estudo, entre outros.

Neste problema o grau de refinamento da malha influencia o tempo de realização da simulação. Uma malha mais refinada (menores dimensões dos volumes) torna a simulação mais demorada, mas também mais precisa e aproximada à situação real. Posto isto realizaram-se várias simulações com diferentes malhas para observar qual a influência do grau de refinamento da malha na obtenção dos resultados finais. Este estudo será mostrado mais a frente no capítulo referente a apresentação e discussão dos resultados. (Capítulo 5).

O primeiro passo realizado para a geração da malha foi identificar e criar as regiões do domínio onde a malha poderá ter diferentes configurações, onde posteriormente serão atribuídas diferentes condições de fronteira (6 regiões). As regiões criadas foram as seguintes: Base, Inlet (Entrada), Norte, Sul, Topo, e Outlet (Saída). Na Figura 14 apresenta-se as respectivas regiões do domínio de cálculo criadas.

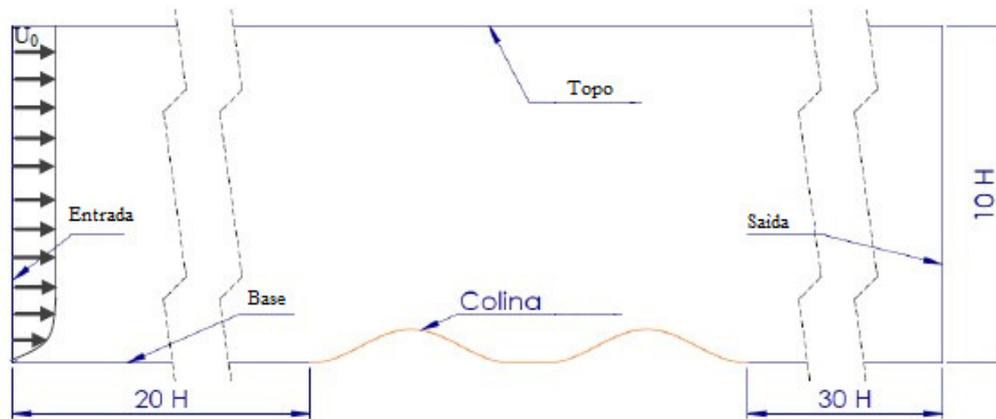


Figura 14 - Regiões do domínio de cálculo.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros utilizados para a geração da malha.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a geração da malha.

Spacing	Body spacing	Option	Geral	Base
	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
Inflation		Number of inflated layers	–	30
		Expansion Factor	–	1.1
		Minimum Internal Angle [Degrees]	–	2.5
		Maximum External Angle [Degrees]	–	10
		Define First Layer by y^+	–	y^+
		y^+	–	11
		Reynolds Number	–	Variável em função de U_0
		Reference Length [mm]	–	60
		First Prism Height	–	Variável em função de y^+ e de Re

Optou-se por definir a altura da primeira camada da *Inflation layer* através da função de parede y^+ , dada pela seguinte expressão:

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} K_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (5)$$

em que y_p é a distância do primeiro ponto à parede, k_p a energia cinética turbulenta naquele ponto, C_μ uma constante do modelo de turbulência e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

Este tipo de função serve de “ligação” entre as células próximas da parede e as variáveis a calcular numa zona mais afastada da parede. Para o caso em estudo utilizou-se o valor $y^+ = 11$ para esta visto ser este o valor mínimo para que a velocidade média do escoamento com perfil logarítmico possa ser utilizado e consequente aplicação das leis de parede.

O número de Reynolds para o caso de apresentado na tabela foi calculado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{U_0 L}{\nu} \quad (6)$$

em que ν é a viscosidade cinemática do fluído e L uma dimensão característica do corpo, neste caso foi utilizado a altura das colinas, H .

Como já foi referido, na realização das simulações experimentais testaram-se duas velocidades distintas 8.3 e 9.1 m/s. O número de Reynolds para estas duas velocidades do escoamento não perturbado são respectivamente 3.3×10^4 e 3.6×10^4 .

O parâmetro *First Prism Height* varia em função do número de Reynolds e do valor da função de parede atribuído (y^+). Para o caso em que o número de Reynolds toma o valor de 3.3×10^4 , a altura deste parâmetro é de 0.38 mm, para o número de Reynolds mais elevado aquela distância é 0.35 mm.

4.3. Pré-Processamento

A próxima etapa no processo da simulação numérica consiste na definição das condições de fronteira e especificações das condições do domínio. Este passo realiza-se após a geração da malha, no módulo *CFX-Pre*.

4.3.1. Domínio

O domínio é a região onde são definidos e calculados todos os parâmetros do escoamento que se pretende estudar. Neste são definidos o modelo de turbulência, o tipo de fluido, o regime do escoamento, as propriedades do escoamento, etc.

De seguida são apresentados as características adoptadas para o domínio de cálculo:

Tabela 2 – Características do domínio do fluido.

Tipo de Fluido	Pressão de referência	Regime	Transferência de calor	Modelo de Turbulência
Ar a 25° C	1 [atm]	Permanente	Isotérmico a 25° C	K-ε

4.3.2. Modelo de turbulência

O modelo de turbulência utilizado na resolução do problema em questão foi o modelo padrão K-ε de Launder e Spalding (1974). Este utiliza duas equações para caracterizar as propriedades turbulentas do escoamento, designadamente o transporte da energia cinética turbulenta (K) e a sua taxa de dissipação (ε). A variável K quantifica a energia cinética turbulenta enquanto a variável ε a taxa de dissipação turbulenta.

4.3.3. Condições de fronteira

As condições de fronteira correspondem a todas as regiões da envolvente criadas aquando da geração da malha. Cada uma destas regiões possui um fenómeno físico associado. De seguida serão mostradas as características das respectivas regiões.

Outlet (Saída)

Na fronteira de saída assume-se que o escoamento se encontrava perfeitamente desenvolvido pelo que o gradiente na perpendicular à superfície é considerado nulo. As restantes características da condição de fronteira de saída são:

Tabela 3 – Características das condições de fronteira na saída.

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

*Inlet (Entrada)***Tabela 4** – Características das condições de fronteira na entrada.

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

O perfil de velocidades na entrada foi medido durante a realização das simulações experimentais e verificou-se que o perfil da componente média da velocidade pode ser descrito aproximadamente pela seguinte lei de potência,

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (7)$$

em que u é a componente média longitudinal da velocidade, U_0 a velocidade do escoamento não perturbado, δ é a espessura da camada limite que toma um valor de 0.1 m e α o expoente da lei da potência que tem um valor de 0.11. Na Figura 15 apresenta-se a comparação entre as medições experimentais, para ambas as velocidades utilizadas na realização deste trabalho, e os perfis de velocidade usados nas simulações computacionais.

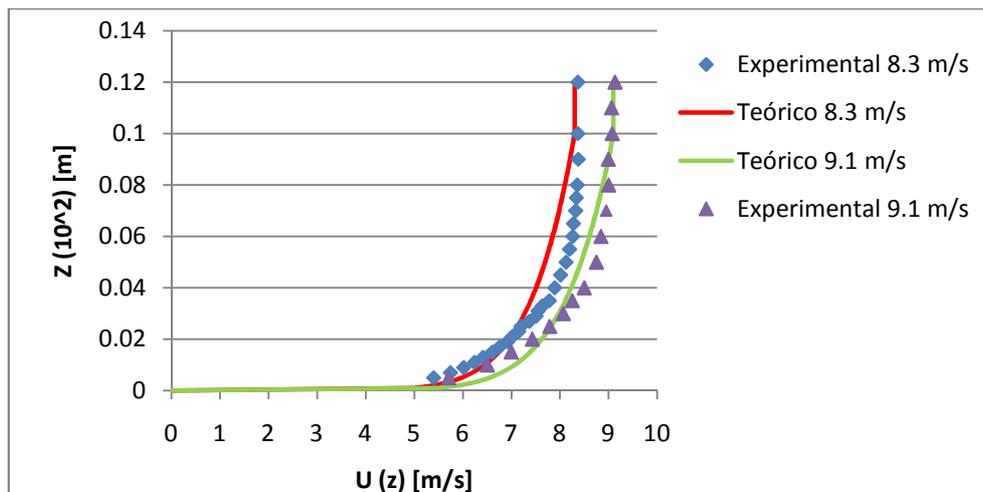


Figura 15 - Comparação do perfil teórico e experimental para duas velocidades do escoamento não perturbado estudadas, 8.3 e 9.1 m/s.

Topo

Tabela 5 – Características das condições no topo.

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

Base

Tabela 6 – Características das condições de fronteira da base.

Tipo de Fronteira	Tipo de escorregamento sobre a fronteira	Rugosidade (K_s)
Parede	Sem escorregamento	$d/10 = 5 \times 10^{-5}$ *

* Efectuaram-se vários testes computacionais com diferentes valores para a rugosidade equivalente (K_s).

Na Tabela 6, o parâmetro representado no campo referente ao valor da rugosidade representa o valor médio da partícula (d) e toma o valor de 0.5 mm. Foi verificado que a distribuição da tensão tangencial é bastante influenciada pelo valor da rugosidade (K_s). No capítulo 5 são apresentados os resultados desse estudo.

Em relação às regiões Norte e Sul o tipo de fronteira foi considerada como sendo de simetria.

4.4. Resolução das equações

Uma vez definidas as condições de fronteira e as características do escoamento que se pretende estudar, o próximo passo será a resolução das equações através do módulo *CFX-Solver*. No presente estudo as equações a resolver são a equação de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e as equações relativas ao modelo de turbulência. Para a resolução das equações é necessário definir os critérios de convergência. Neste caso definiu-se 500 para o número máximo de iterações e um resíduo máximo de 1×10^{-5} . A simulação termina quando o número máximo de iterações é atingido, mesmo que o valor do resíduo esteja acima do valor definido, ou caso o valor do resíduo seja inferior ao resíduo máximo estabelecido. Em todas as simulações efectuadas a resolução das equações foi conseguida antes de atingido o máximo de iterações.

4.5. Pós-Processamento

Este passo refere-se à análise dos resultados obtidos através do módulo *CFX-Post*, que consistia essencialmente na obtenção da distribuição da tensão tangencial na colina e caracterização da zona de recirculação no seu rasto. Para tal foi criado um plano paralelo ao definido por xz a uma distância de 5 mm já que a largura do domínio, na direcção transversal era de 10 mm. De seguida criou-se uma polilinha que interceptava o plano referido e a região definida como base (região que contém a colina) para posterior extracção dos dados pretendidos.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo far-se-á a apresentação e discussão dos resultados obtidos. A sua obtenção foi feita através da simulação experimental em túnel aerodinâmico e da simulação computacional pela utilização do software de simulação de escoamentos *CFX*, versão 11.0. Os resultados referem-se à obtenção da distribuição do coeficiente de atrito ao longo da colina, caracterização da topologia do escoamento, e medição do campo de velocidade no rasto das colinas. Expõem-se ainda os resultados dos vários estudos realizados para a afinação dos parâmetros malha e rugosidade para a simulação computacional.

Na Figura 16 mostra-se uma representação esquemática de duas colinas dispostas em tandem, bem como o sistema de eixos adoptado para o presente estudo. No caso de uma colina isolada o sistema de eixos utilizado é o mesmo que o representado na figura.

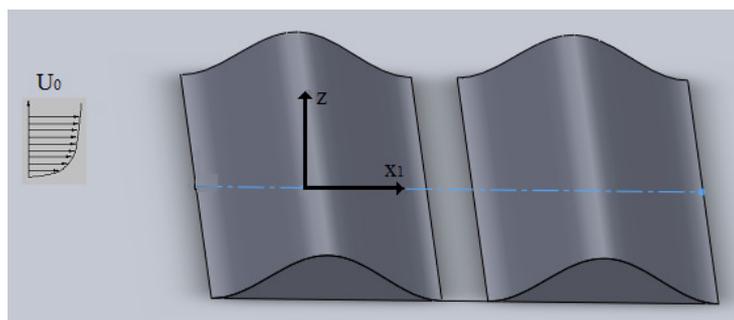


Figura 16 - Representação esquemática de duas colinas dispostas em tandem e o sistema de eixos adoptado.

5.1. Testes de refinamento da malha

Os testes de refinamentos da malha servem para verificar os resultados obtidos nas simulações computacionais em relação à malha usada. Nesta secção apresentam-se os vários testes realizados, nomeadamente em relação ao domínio de cálculo, espaçamento, ao

número de camadas da *inflation layer* e à rugosidade (K_s), um parâmetro particularmente importante na obtenção da distribuição do coeficiente de atrito.

5.1.1. Domínio de cálculo da simulação

Na Figura 17 faz-se a análise da influência da extensão do domínio de cálculo na distribuição do coeficiente de atrito na colina. Verificou-se o efeito da distância a montante da colina (distância do início do domínio até à colina), que intitulamos de entrada, e a distância a jusante da colina (distância do final da colina até ao final do domínio), que denominamos de saída.

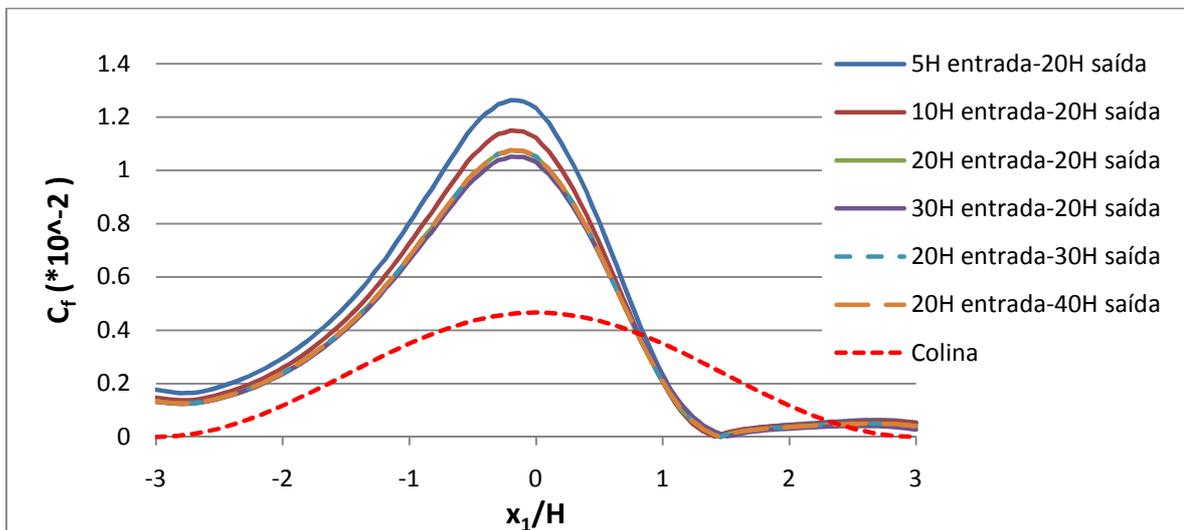


Figura 17 - Influência do domínio de cálculo na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado.

Verifica-se que a partir de uma distância de $20H$ desde o início do domínio até à colina não há grande variação do coeficiente de atrito. De forma análoga constata-se que, para uma zona de saída de comprimento superior a $30H$, a distribuição do coeficiente de atrito é praticamente invariável. Perante este facto o domínio utilizado nas simulações possui as seguintes dimensões: $20H$ na entrada e $30H$ na saída.

5.1.2. Espaçamento

Analisa-se de seguida a influência do espaçamento da malha (Figura 19) na distribuição do coeficiente de atrito ao longo da colina. Para averiguar a sensibilidade deste parâmetro, utilizaram-se três malhas distintas. Modificou-se o espaçamento nas várias regiões que constituem o domínio, especialmente na região da próxima base, visto ser esta a região onde se pretende obter o coeficiente de atrito. O estudo em questão foi realizado para o modelo de comprimento $6H$, com uma velocidade do escoamento não perturbado de 8.3 m/s , e para um valor de K_s igual a $1.667 \times 10^{-5} \text{ m}$. Este valor de K_s corresponde a $\frac{d}{30}$ sendo d o diâmetro médio dos grãos de areia usados nos testes de erosão por Fino (2011), e igual a 0.5 mm . Na Figura 18 apresenta-se o espaçamento na região da base para as três malhas estudadas, em concreto na zona da colina.

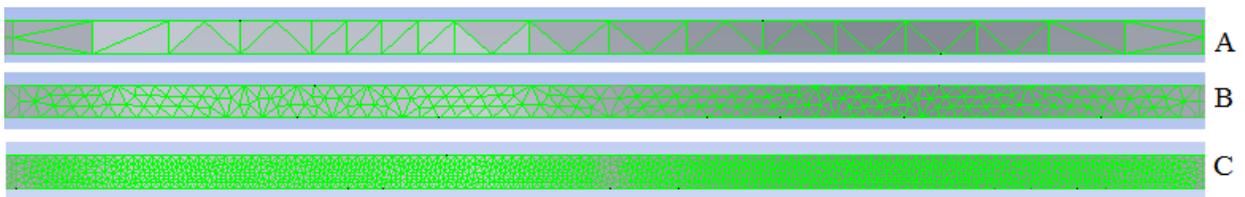


Figura 18 - Malhas utilizadas para verificar a sensibilidade do parâmetro espaçamento. A - malha grosseira; B - malha intermédia; C - malha refinada. (vista de topo da zona da colina)

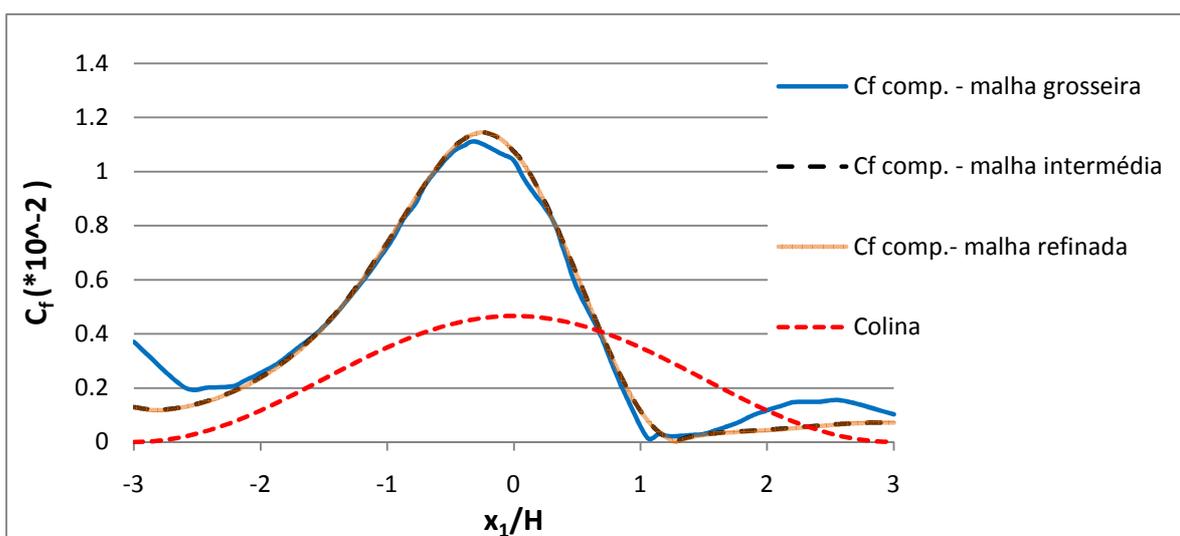


Figura 19 - Influência do espaçamento na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$.

A malha grosseira apresenta uma distribuição do coeficiente de atrito algo irregular no cume da colina, sendo que na face de montante e jusante a distribuição assemelha-se à das restantes malhas estudadas. A diferença de C_f entre a malha intermédia e a malha refinada é praticamente nula, verificando-se assim que a malha intermédia apresenta um bom grau de refinamento. O tempo de simulação da malha mais refinada é muito superior ao da malha intermédia pelo que durante as simulações a malha utilizada foi a segunda.

5.1.3. Número de camadas da *inflation layer*

Apresenta-se de seguida o estudo realizado para verificar a influência do número de camadas da “inflation layer”, nos resultados computacionais de C_f . O estudo em questão foi realizado para o modelo de comprimento $6H$, com uma velocidade do escoamento não perturbado de 8.3 m/s, e para um valor de K_s igual a $1.667 \times 10^{-5} \left(\frac{d}{30}\right)$.

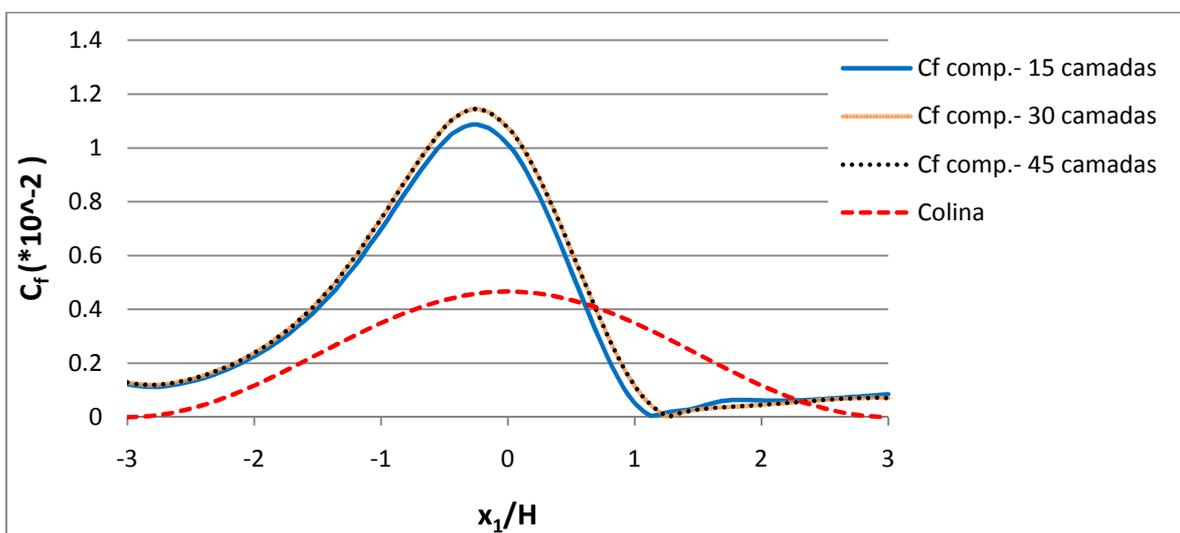


Figura 20 - Influência do número de *inflation layers* na distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$.

Pela análise da Figura 20 verifica-se que o número de camadas da *inflation layer* influencia na distribuição do coeficiente de atrito. Comparando os casos de 30 e 45 camadas observa-se que a distribuição do coeficiente de atrito não é alterada, podendo-se

assim afirmar que há independência em relação a este parâmetro. Assim pelo facto de atingirmos a independência com um valor de 30 camadas, foi este o valor utilizado durante as simulações seguintes.

5.2. Influência da rugosidade na previsão computacional do coeficiente de atrito

Nesta subsecção será mostrada a influência do parâmetro rugosidade equivalente (K_s) na distribuição do coeficiente de atrito. Bagnold (1941) afirma que, para o estudo da erosão da areia, o valor da rugosidade a considerar depende do diâmetro da partícula (d). Aquele autor afirma que o valor a utilizar é aproximadamente igual a $\frac{1}{30}$ do diâmetro da partícula. Realizou-se um estudo da sensibilidade do parâmetro K_s na distribuição do coeficiente de atrito, para o modelo de comprimento $6H$ isolado, e para uma velocidade do escoamento não perturbado de 8.3 m/s.

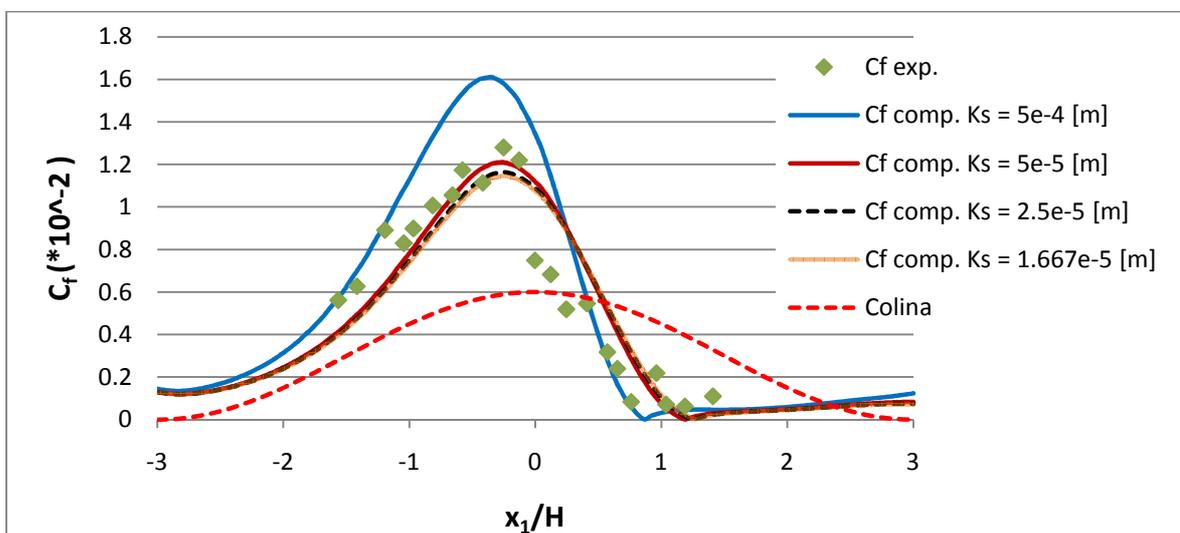


Figura 21 - Influência da rugosidade na distribuição do coeficiente de atrito na superfície do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s.

Analisando a Figura 21 pode-se constatar que com um aumento do valor da rugosidade o coeficiente de atrito também aumenta. O valor da rugosidade que mais se aproxima dos resultados experimentais é de 5×10^{-5} m ($\frac{d}{10}$), sendo este o valor utilizado

durante as simulações efectuadas. Os valores experimentais foram obtidos para idênticas condições de escoamento.

5.3. Distribuição do coeficiente de atrito para o modelo de comprimento $5H$

Como já se referiu anteriormente, foram estudadas duas configurações distintas para duas velocidades do escoamento não perturbado. Primeiramente serão apresentados os resultados para a colina isolada e de seguida para a situação de duas similares dispostas em tandem, colocadas a diferentes distâncias.

Colina colocada a diferentes distâncias do bocal do túnel

Na Figura 22 e Figura 23 apresentam-se os valores da distribuição do coeficiente de atrito com o modelo colocado a diferentes distâncias do bocal do túnel, segundo a direcção longitudinal, respectivamente para 8.3 e 9.1 m/s. A medida em questão é denominada de x_t e refere-se à distância desde o início da secção de trabalho do túnel aerodinâmico até ao centro da colina, segundo a direcção longitudinal.

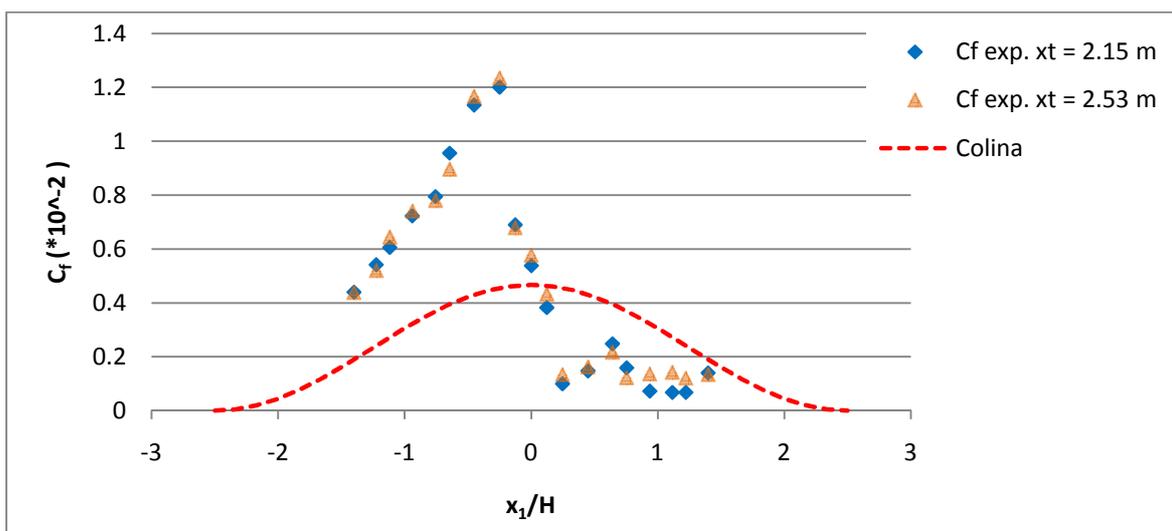


Figura 22 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $5H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_t .

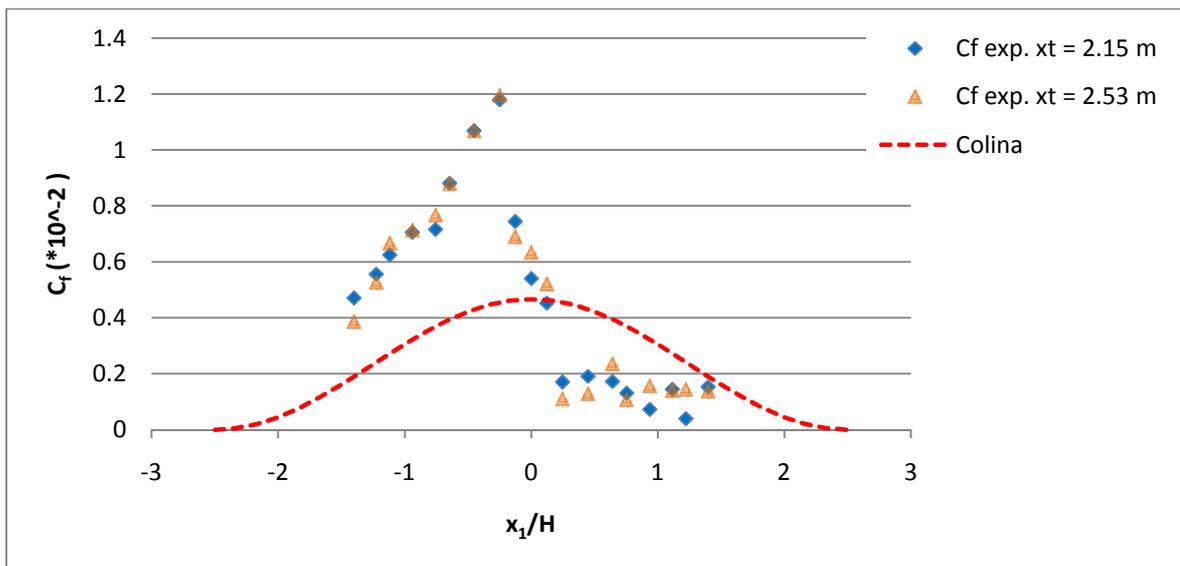


Figura 23 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $5H$ isolada, para $U_0 = 9.1$ m/s, para diferentes valores de x_f .

Constata-se que a distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo $5H$, quando colocado na segunda posição, ou seja a uma distância $x_f = 2.53$ m, é idêntica à registada na primeira posição, $x_f = 2.15$ m. Com isto pode-se conferir que, quando for estudada a interferência entre colinas, a variação da distribuição do coeficiente de atrito na colina colocada a jusante deve-se apenas à interferência da colina de montante. Apesar de algumas pequenas discrepâncias dos valores do coeficiente de atrito pode-se afirmar que há independência em relação à posição da colina da distribuição de C_f .

Analisa-se agora a influência da velocidade do escoamento. Na Figura 24 apresenta-se a distribuição de C_f ao longo da colina $5H$ isolada. As duas séries, obtidas para diferentes velocidades são praticamente coincidentes, pelo que se pode afirmar que há independência de resultados em relação ao número de Reynolds (Re).

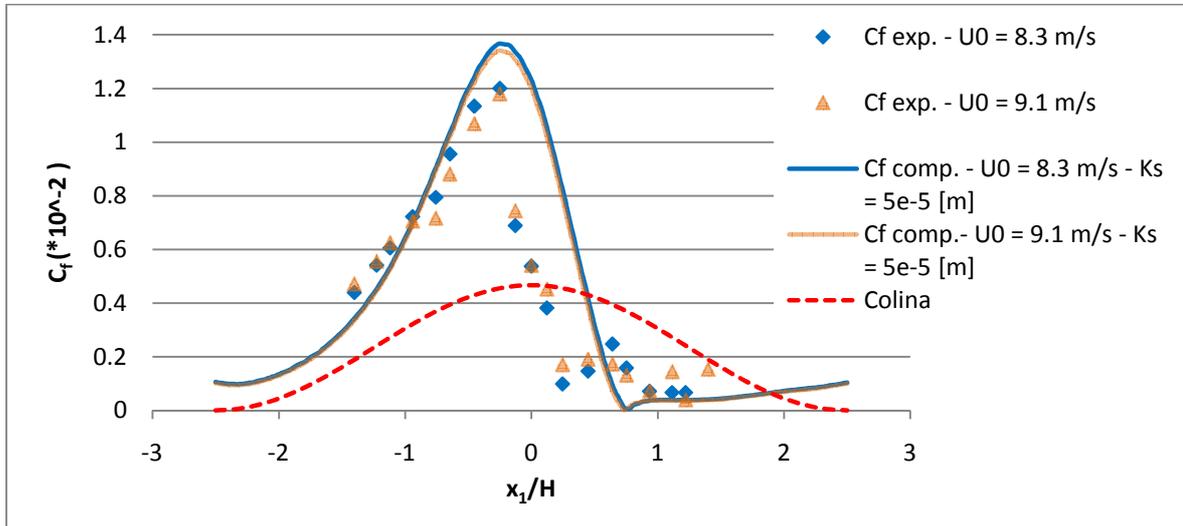
Colina isolada

Figura 24 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento 5H isolado respectivamente para um valor $U_0 = 8.3$ e 9.1 m/s.

Pela análise da Figura 24 podemos observar que há um aumento progressivo do coeficiente de atrito na face de montante do modelo atingindo-se o máximo de C_f próximo de $x_1/H = -0.25$, portanto ligeiramente a montante da crista da colina. A partir deste ponto há um decréscimo acentuado do coeficiente de atrito, sobretudo na face de jusante do modelo, devido a forte desaceleração do escoamento. Na zona de recirculação os valores de C_f são bastante reduzidos e praticamente constantes, o que está de acordo com a erosão desprezável normalmente observada em zonas de recirculação. A zona de recirculação é caracterizada por possuir valores do coeficiente muito reduzidos sendo isso verificado em $x_1/H = 0.247$ e a jusante deste ponto.

Comparando os valores obtidos experimentalmente com os das simulações numéricas pode-se verificar que há alguma discrepância junto do topo da colina, onde os valores computacionais são superiores aos medidos. Ainda assim, a concordância entre os valores experimentais e computacionais é sensivelmente boa, sobretudo tendo em atenção a incerteza relativa aos valores medidos com as sondas de Irwin.

Interação de colinas

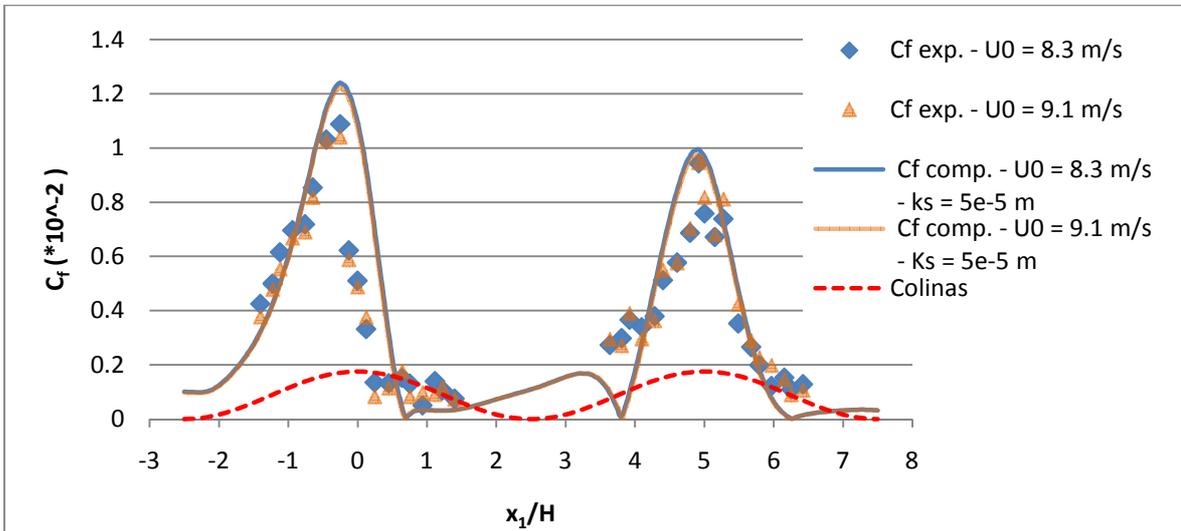


Figura 25 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares com comprimento $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas nula, $U_0 = 8.3$ e 9.1 m/s.

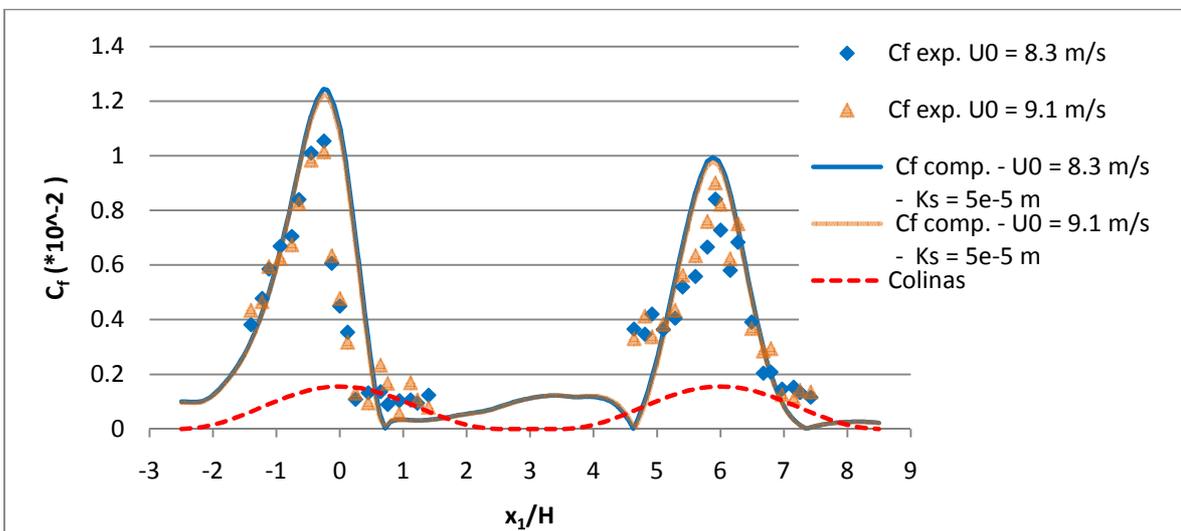


Figura 26 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares com comprimento $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H e $U_0 = 8.3$ e 9.1 m/s.

Da análise sobre a Figura 25 e Figura 26, relativas a colinas $5H$, constata-se que a colina a jusante é claramente influenciada pela presença da colina a montante, sendo que a da tensão tangencial nesta colina diminui. Este facto pode ser explicado pela

existência de uma zona de recirculação entre as colinas, fazendo com que o gradiente de velocidade segundo a vertical seja menor. Na face de jusante da segunda colina podemos verificar que se forma uma “segunda” zona de recirculação visto os valores do coeficiente de atrito serem muito baixos. Comparando os valores da colina a montante com os resultados obtidos para o caso de uma colina isolada verifica-se que o coeficiente de atrito no cume da desta sofre uma ligeira redução. Isto mostra que a presença de uma colina a jusante influencia o escoamento na colina de montante.

Constata-se ainda que na colina colocada a jusante os valores experimentais e numéricos apresentam uma boa concordância para ambas as distâncias estudadas (0 e H). Em relação à colina a montante podemos observar que, tal como para o caso de uma colina isolada, há uma diferença entre valores obtidos computacional e experimentalmente, em especial junto do topo da colina.

5.4. Distribuição do coeficiente de atrito para o modelo de comprimento $6H$

Nesta subsecção apresentam-se os resultados obtidos para a colina com comprimento $6H$. Será discutido o caso de uma colina isolada e, de seguida, a situação de duas similares dispostas em tandem, para diferentes velocidades do escoamento não perturbado, 8.3 e 9.1 m/s.

Modelo colocado a diferentes distâncias do bocal do túnel

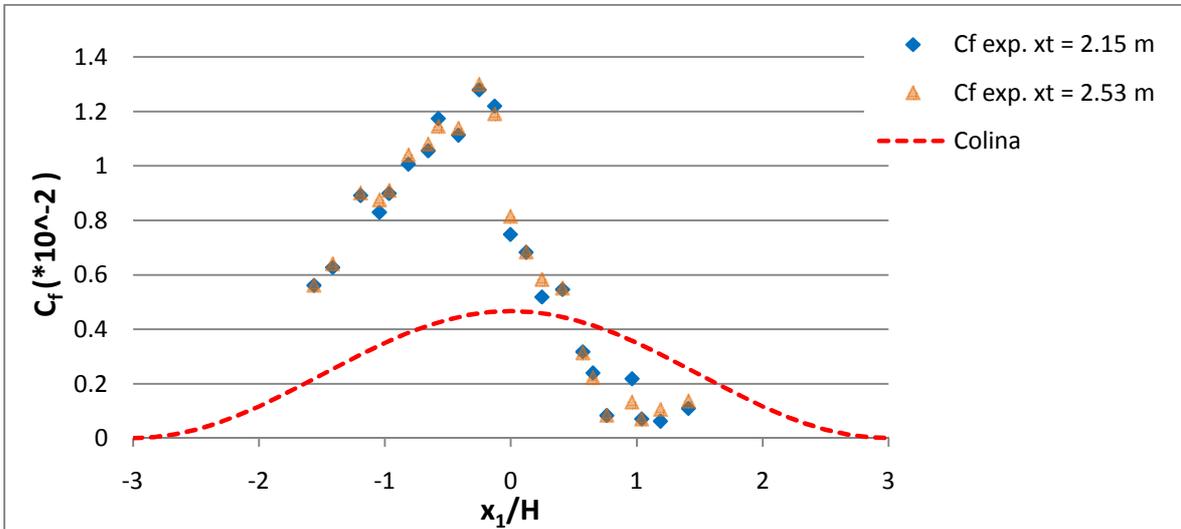


Figura 27 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_t .

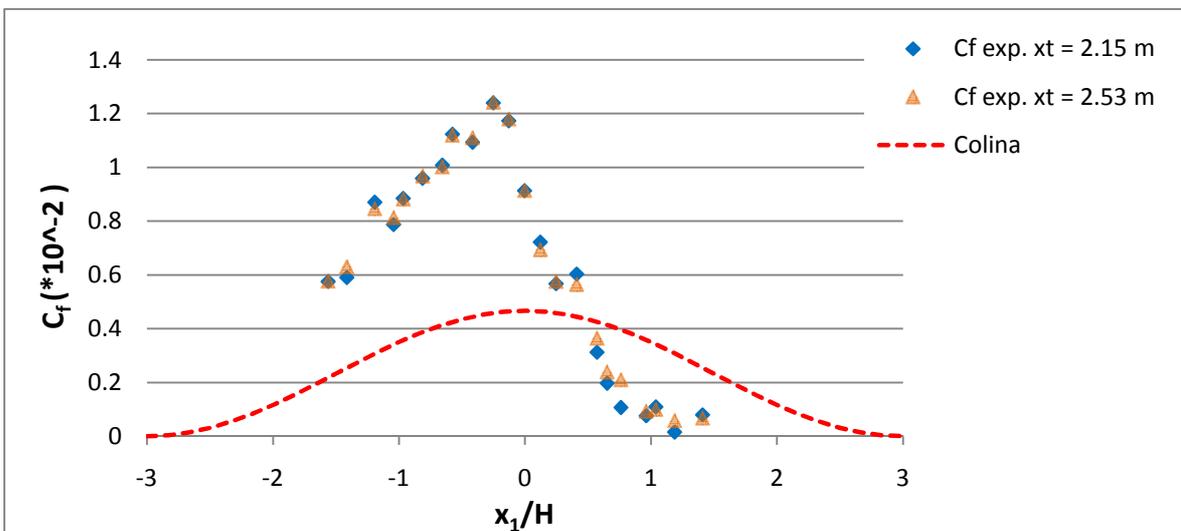


Figura 28 - Distribuição experimental do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ m/s, para diferentes valores de x_t .

A análise sobre a Figura 27 e Figura 28 conduz às mesmas conclusões já apresentadas aquando da análise do modelo de comprimento $5H$. Neste caso, apesar de uma discordância em alguns valores obtidos, constata-se que as medições efectuadas nas duas posições x_t conduziram, genericamente, a distribuições bastante similares.

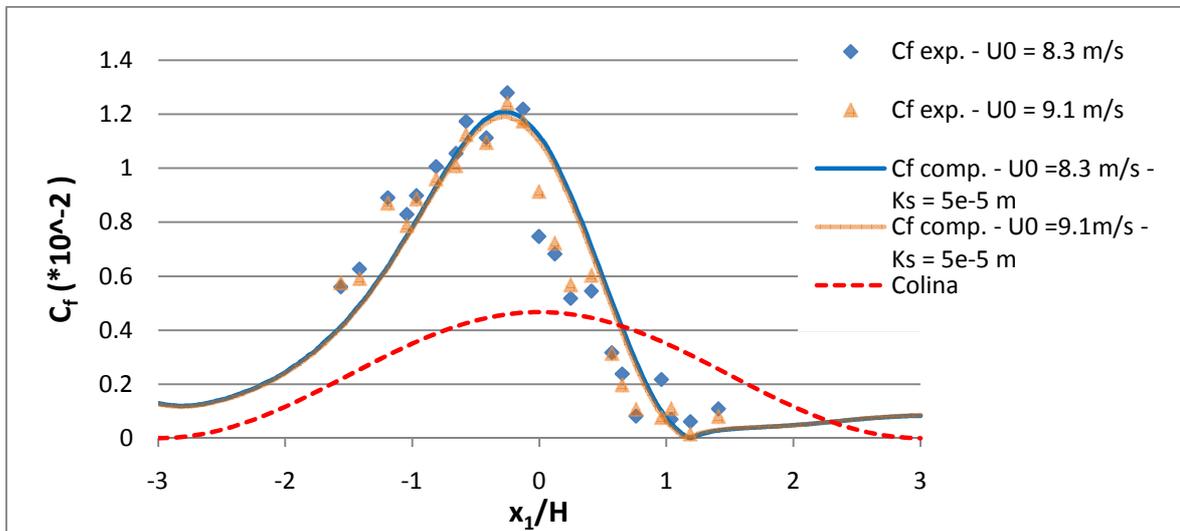
Colina isolada

Figura 29 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo de comprimento $6H$ isolado, para $U_0 = 8.3$ e 9.1 m/s .

Conforme se pode verificar na Figura 29 a distribuição do coeficiente de atrito apresenta a mesma tendência em relação ao caso do modelo de comprimento $5H$, verificando-se um aumento progressivo do coeficiente de atrito na face de montante, atingindo o seu máximo para um valor próximo de $x_1/H = -0.25$. Podemos ainda verificar que a partir de $x_1/H = 0.762$, e para jusante deste ponto, a distribuição do coeficiente de atrito apresenta valores muito reduzidos, o que indica a existência de uma zona de recirculação.

Da confrontação entre os resultados experimentais e computacionais constata-se que experimentalmente os valores do coeficiente de atrito no topo da colina são superiores aos obtidos pela simulação numérica. Apesar de algumas diferenças, a concordância entre a previsão computacional e as medições experimentais é globalmente satisfatória.

Interação de colinas

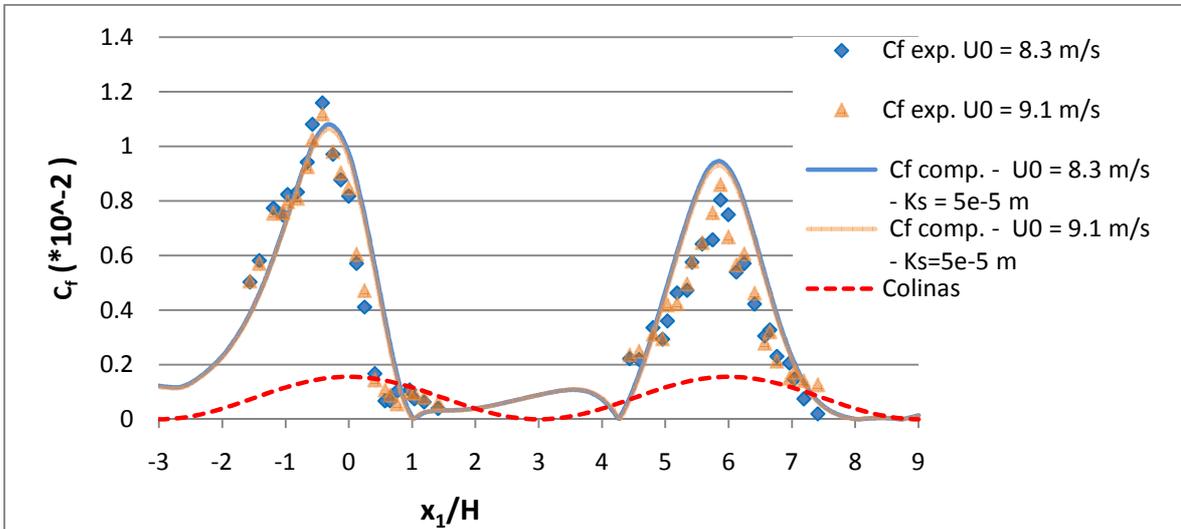


Figura 30 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares dispostas em tandem, com comprimento $6H$, para uma distância entre colinas nula, $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s.

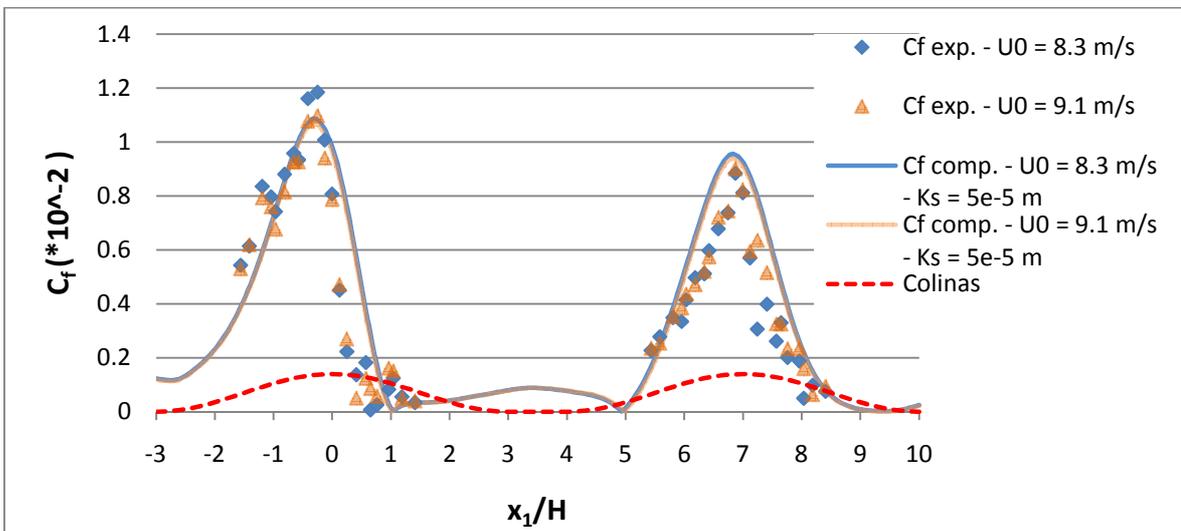


Figura 31 - Distribuição do coeficiente de atrito ao longo de duas colinas similares dispostas em tandem, com comprimento $6H$, para uma distância entre colinas H e $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s.

A distribuição de C_f para o caso de interação entre colinas do modelo de comprimento $6H$ é similar ao verificado para o modelo $5H$. A análise e reflexão sobre a Figura 30 e Figura 31 conduz às mesmas conclusões que as já apresentadas durante a análise do modelo de comprimento $5H$. Na face de jusante da colina colocada a montante,

para ambas as distâncias estudadas, verifica-se que em $x_1/H= 0.571$, e a jusante deste ponto até ao final da colina, o coeficiente de atrito toma valores muito reduzidos o que evidencia a existência de uma zona de recirculação.

Tal como para o caso isolado, no topo da colina colocada a montante os valores experimentais do coeficiente de atrito são superiores aos obtidos através da simulação numérica. Apesar de algumas diferenças há que salientar a boa concordância entre os valores experimentais e computacionais para esta colina.

Em resumo, da comparação dos resultados experimentais com os numéricos, verifica-se alguma discordância na comparação entre estes. Para o modelo de comprimento $5H$ esse facto é mais visível que para o de comprimento $6H$. Essas discrepâncias podem ser devidas às restrições das sondas ao serem usadas em superfícies com alguma inclinação, ou resultantes das simplificações adoptadas nas simulações numéricas. Apesar do referido podemos afirmar que ambos os grupos de resultados apresentam uma boa concordância.

5.5. Influência da rugosidade superficial na distribuição do coeficiente de atrito – análise experimental

Apresentam-se de seguida, os ensaios experimentais realizados para analisar a sensibilidade do parâmetro rugosidade na distribuição do coeficiente de atrito. Para aumentar a rugosidade superficial utilizou-se areia, com um diâmetro médio (d) de 0.5 mm, que foi colada na superfície da colina. Foram apenas realizados testes para o caso de uma colina isolada, para cada um dos modelos $5H$ e $6H$, para uma velocidade $U_0= 8.3$ e 9.1 m/s, sendo apenas mostrados os resultados para $U_0= 9.1$ m/s por limitação de espaço.

Numa primeira abordagem à Figura 32 e Figura 33 é visível que, experimentalmente, com o aumento da rugosidade o coeficiente de atrito ao longo da colina diminui em ambos os modelos estudados. No modelo $5H$ podemos ver que essa diminuição não é tão acentuada, comparativamente ao modelo $6H$, sendo que neste o efeito é mais pronunciado na sua face de jusante.

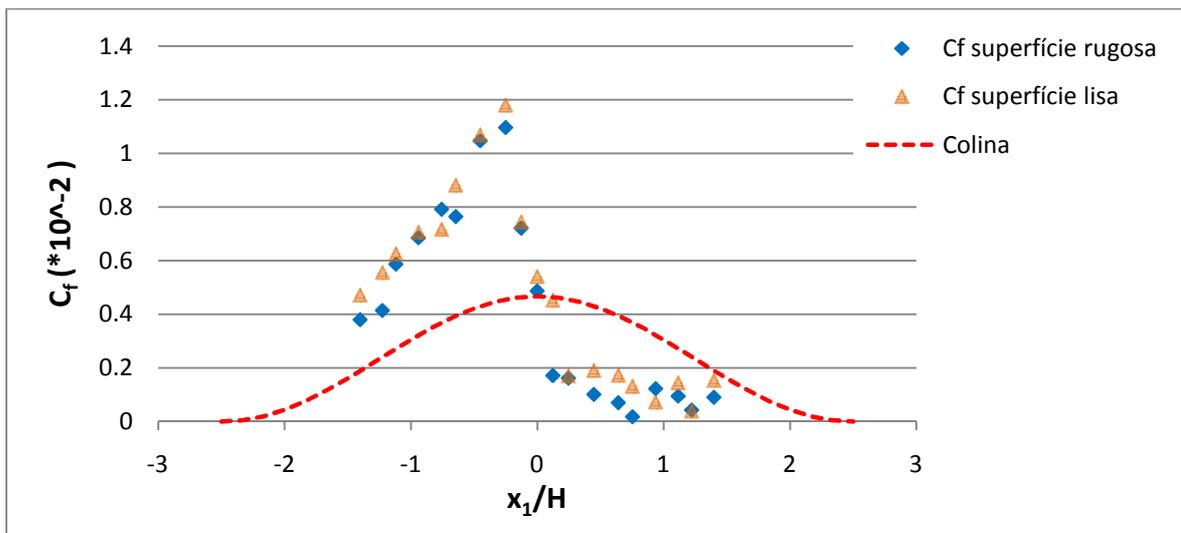


Figura 32 - Comparação da distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo 5H isolada para diferentes casos de rugosidade, com $U_0=9.1$ m/s.

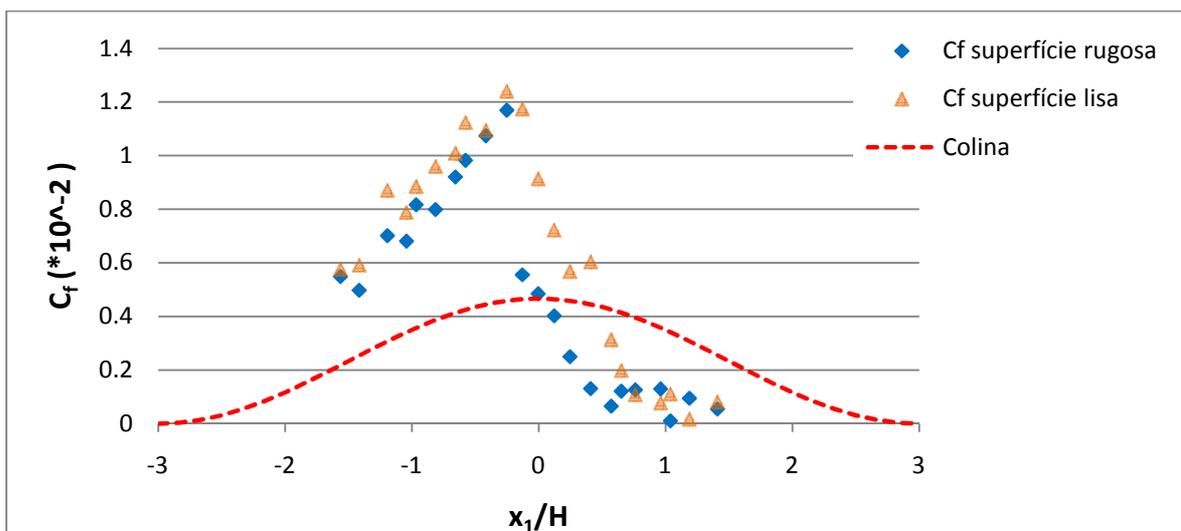


Figura 33 - Comparação da distribuição do coeficiente de atrito ao longo do modelo 6H isolada para diferentes casos de rugosidade, com $U_0=9.1$ m/s.

5.6. Medição do campo de velocidade em torno da colina

Nesta parte do trabalho mostram-se as medições do campo de velocidade efectuadas em torno de uma colina isolada e para a situação de duas dispostas em tandem colocadas a diferentes distâncias. Para tal utilizou-se uma sonda de 7 furos, estando esta

acoplada a um mecanismo de atravessamento. Apenas foram realizados ensaios para $U_0 = 8.3$ m/s.

O principal objectivo destas medições é obter informação mais detalhada sobre a estrutura da zona de recirculação, e medir a localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento, para posterior comparação com dados obtidos através da simulação numérica.

5.6.1. Modelo de comprimento $5H$

Para este modelo apenas foi possível efectuar medições para o caso de uma colina isolada. Na representação do campo de velocidades, para o caso isolado apresentado na Figura 34, podemos verificar a existência de alguns pontos onde não foi possível obter medições devido a limitações de uso da sonda de 7 furos.

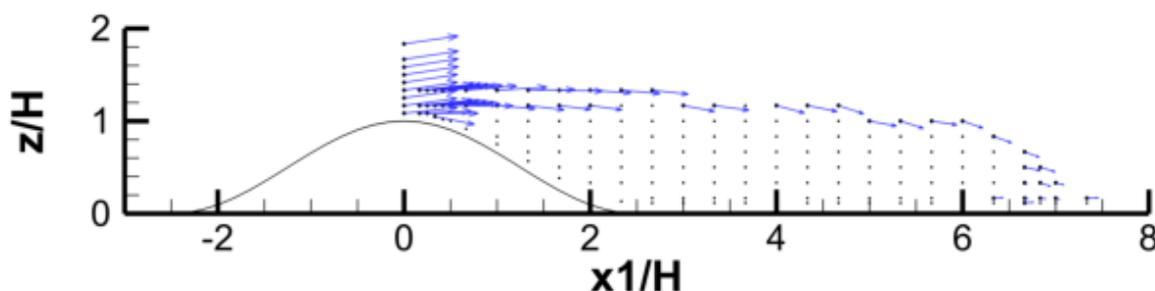


Figura 34 - Representação vectorial da evolução da forma do perfil de velocidade no rasto do modelo de comprimento $5H$ isolado.

O perfil de velocidades varia ao longo da colina, sendo visível que no topo desta há uma forte aceleração do escoamento, confirmando assim a distribuição do coeficiente de atrito apresentado na secção 5.3. Na face de jusante verifica-se uma desaceleração do escoamento, e conseqüente formação de uma zona de recirculação. O ponto de separação do escoamento ocorre para um valor próximo de $x_1/H = 0.33$ e o ponto de recolamento localiza-se sensivelmente em $x_1/H = 6.33$. Na proximidade destas posições usou-se uma grelha de medições com um espaçamento mais fino, tirando partido da informação proveniente dos ensaios de visualização efectuados com fios de lã, conforme se mostrará na secção 5.7.

5.6.2. Modelo de comprimento $6H$

Mostram-se agora as medições efectuadas para o modelo de comprimento $6H$. Neste modelo foi possível realizar o estudo da interacção de colinas e a apresentação dos resultados segue os mesmos cânones dos expostos anteriormente.

Colina isolada

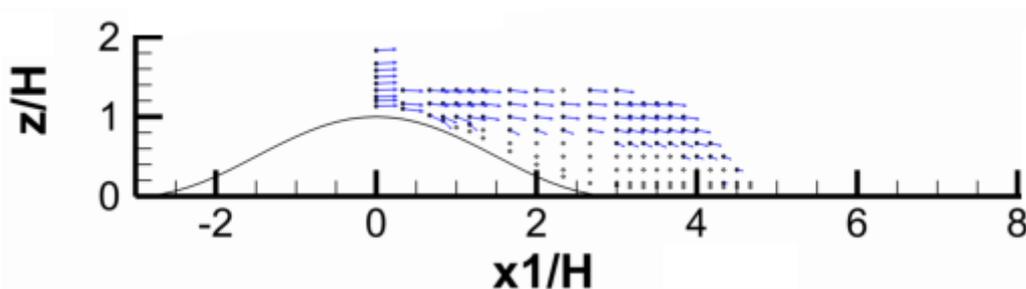


Figura 35 - Representação vectorial do campo de velocidade no rasto do modelo de comprimento $6H$ isolado.

Na Figura 35, salienta-se a orientação dos vectores de velocidade que mostram que o escoamento tende a fazer-se de uma forma tangente à superfície da colina, sendo visível também a fronteira superior da bolha de recirculação. Comparando o campo vectorial deste com o da colina $5H$ verifica-se que este possui uma zona de recirculação inferior à do anterior. Para este modelo o ponto de separação situa-se na imediação de $x_1/H = 0.83$ e o ponto de recolamento localiza-se próximo de $x_1/H = 4.33$.

Interacção de colinas

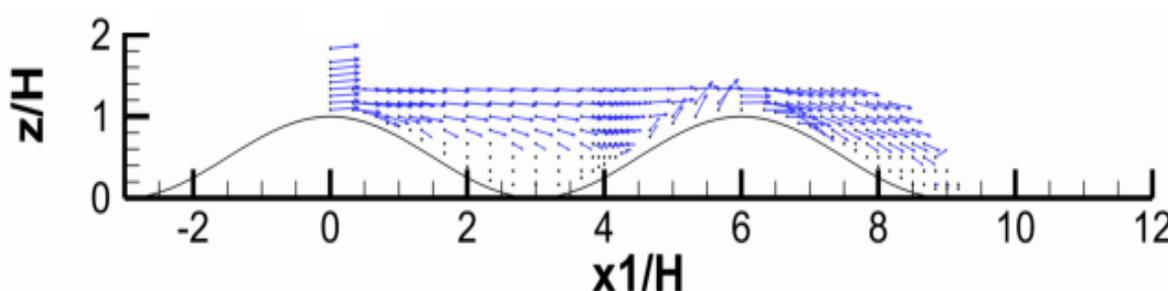


Figura 36 - Representação vectorial do campo de velocidade ao longo de duas colinas $6H$ similares para uma distância nula entre colinas.

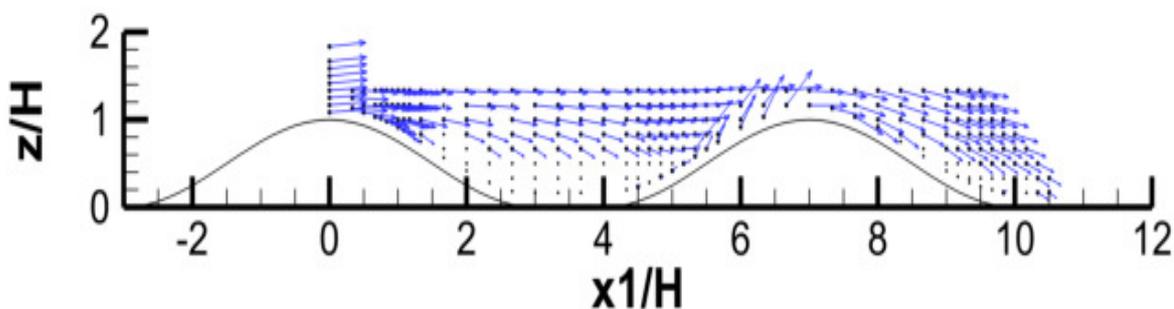


Figura 37 - Representação vectorial do campo de velocidade ao longo de duas colinas $6H$ similares para uma distância H entre colinas.

Para o caso da interacção entre colinas formam-se duas zonas de recirculação distintas, uma entre as duas colinas e outra na face de jusante da colina colocada na segunda posição (a jusante). Verifica-se que a estrutura da zona de recirculação entre colinas é idêntica para as duas distâncias entre colinas estudadas. Em relação à extensão da zona de recirculação na face de jusante da segunda colina verifica-se que esta diminui com o aumento da distância entre colinas.

A orientação dos vectores de velocidade na face de montante da colina colocada a jusante mostra claramente que o escoamento sofre uma forte aceleração no topo desta. Nesta verifica-se ainda que ao longo da face de jusante há uma desaceleração do escoamento. Confrontando estes resultados com a distribuição do coeficiente de atrito verifica-se coerência entre os dois grupos de resultados obtidos. Na secção seguinte comparam-se a localização dos pontos de separação e recolamento acabados de expor com os obtidos através da simulação numérica bem como pela observação de fios de lã colocados na superfície dos modelos.

5.7. Localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento

Nesta secção faz-se a comparação da localização dos pontos de separação e recolamento do escoamento, conseguida através de várias medições efectuadas experimentalmente e pela simulação numérica. Para identificar os pontos de separação e recolamento através da simulação numérica utilizamos a componente longitudinal da velocidade. Para tal, verificou-se quais os pontos em que esta componente altera o seu

sentido. Considerando que esta variava linearmente, entre esses mesmos pontos interpolou-se a posição em que a componente apresentava um valor nulo. Este procedimento foi realizado para os pontos de separação e recolamento. Todas as simulações que serão apresentadas de seguida foram obtidas para um valor $K_s = 5 \times 10^{-5}$ m.

A estrutura seguida para a comparação dos resultados é igual à utilizada nas subsecções anteriores tal como o sistema de eixos adoptado. No anexo A mostram-se as respectivas ilustrações do escoamento.

5.7.1. Modelo de comprimento $5H$

De seguida são apresentados os resultados para o modelo de comprimento $5H$.

Colina isolada

Tabela 7 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para o modelo de comprimento $5H$ isolado.

Configuração	U_0 [m/s]		Separação x_1/H	Recolamento x_1/H
5H isolada	8.3	Computacional	0.76	4.53
		Fios de lã	0.42	5.67
		Sonda de 7 furos	0.33	6.33
	9.1	Computacional	0.73	4.65
		Fios de lã	0.42	6.17

Pela análise da Tabela 7 verifica-se que são marcantes as diferenças entre os valores experimentais e computacionais, sendo visível que a observação experimental indicou uma bolha de recirculação de dimensão superior à prevista numericamente. O modelo computacional mostra que a posição do ponto de separação para ambas as velocidades estudadas é idêntica, sendo este facto também corroborado pelas observações dos fios de lã. O teste efectuado com a sonda de 7 furos para $U_0 = 8.3$ m/s apresenta uma bolha de recirculação com comprimento $x_1/H = 6$, um valor bastante superior aos restantes casos.

Interacção de colinas

A Tabela 8 apresenta todos os pontos de separação e recolamento que foram possíveis medir no estudo de interacção de colinas com comprimento $5H$.

Tabela 8 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento, para duas colinas similares de comprimento $5H$ colocadas a diferentes distâncias.

Configuração	U_0 [m/s]		Separação (S_1) x_1/H	Recolamento (R_1) x_1/H	Separação (S_2) x_1/H	Recolamento (R_2) x_1/H
$5H$ duas colinas $D.C^1 = 0$	8.3	Computacional	0.71	3.80	6.27	8.06
		Fios de lã	0.42	4.00	6.83	8.00
$5H$ duas colinas $D.C = 0$	9.1	Computacional	0.69	3.82	6.26	8.02
		Fios de lã	0.42	4.00	6.67	7.83
$5H$ duas colinas $D.C = H$	8.3	Computacional	0.71	4.63	7.36	8.82
		Fios de lã	0.33	4.33	7.58	8.67
$5H$ duas colinas $D.C = H$	9.1	Computacional	0.69	4.65	7.36	8.84
		Fios de lã	0.42	4.58	7.67	8.75

Nos resultados apresentados a maior discordância dos resultados ocorre no ponto de separação da colina de montante, sendo visível que o modelo computacional indica a sua localização, mais para jusante, tal como no caso da colina isolada. A extensão da zona de recirculação entre colinas cresce com o aumento da distância entre estas, enquanto a bolha de recirculação na face de jusante da segunda colina possui um comportamento inverso. Este facto já tinha sido observado aquando da realização dos ensaios experimentais, sendo agora também evidenciado numericamente.

Os resultados obtidos, de uma forma geral mostram, uma correlação satisfatória.

5.7.2. Modelo de comprimento $6H$

Na presente secção mostram-se os resultados obtidos para o modelo de comprimento $6H$.

¹ - Abreviatura para designar a distância entre colinas

Colina isolada

Numa primeira abordagem à Tabela 9 observa-se que a localização do ponto de separação desloca-se para jusante em comparação com o modelo de comprimento $5H$. Tal facto já era esperado pois o modelo de comprimento $6H$ possui um declive máximo (27.5°) inferior ao de comprimento $5H$ (32°). Com o aumento do declive e para a mesma rugosidade superficial o ponto de separação tende desloca-se para jusante em situações de menor declive.

Tabela 9 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para o modelo de comprimento $6H$ isolado.

Configuração	U_0 [m/s]		Separação x_1/H	Recolamento x_1/H
6H isolada	8.3	Computacional	1.19	3.98
		Fios de lã	1.17	3.83
		Sonda de 7 furos	0.83	4.33
	9.1	Computacional	1.16	4.05
		Fios de lã	1.00	3.83

Para as duas velocidades do escoamento não perturbado estudadas o modelo computacional apresenta boa concordância com as medições efectuadas com os fios de lã. As diferenças relativamente às medições efectuadas com a sonda de 7 furos são relativamente grandes, tal como no caso $5H$. A medição efectuada com a sonda de 7 furos para uma velocidade $U_0 = 8.3$ m/s, prevê uma bolha de recirculação com comprimento $x_1/H = 3.5$, que, tal como para o caso do modelo de comprimento $5H$, é um valor superior aos das outras metodologias. Um facto importante que interessa realçar tem a ver com o comprimento da zona de recirculação deste modelo o qual é significativamente inferior ao do modelo $5H$. Para este caso isso já seria de esperar devido, mais uma vez, à diferença de declives entre os dois modelos.

Interacção de colinas

A Tabela 10 mostra todos os resultados de todos os ensaios efectuados experimental e numericamente para o estudo de interacção de colinas para o modelo $6H$.

Tabela 10 – Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos pontos de separação e recolamento para duas colinas similares de comprimento $6H$ colocadas a diferentes distâncias.

<i>Configuração</i>	U_0 [m/s]		Separação (S_1) x_1/H	Recolamento (R_1) x_1/H	Separação (S_2) x_1/H	Recolamento (R_2) x_1/H
6H duas colinas D.C = 0	8.3	Computacional	1.03	4.26	8.06	8.72
		Fios de lã	0.83	3.92	7.50	8.50
		Sonda de 7 furos	0.83	4.50	7.17	8.83
6H duas colinas D.C = 0	9.1	Computacional	1.01	4.28	8.02	8.75
		Fios de lã	1.00	4.17	7.83	8.67
6H duas colinas D.C = H	8.3	Computacional	1.05	4.94	–	–
		Fios de lã	0.92	4.67	9.17	9.42
		Sonda de 7 furos	1.00	4.67	8.67	9.67
6H duas colinas D.C = H	9.1	Computacional	1.02	4.98	–	–
		Fios de lã	1	4.67	9.17	9.42

O modelo computacional não prevê nenhuma zona de recirculação no rasto da segunda colina, contrariamente ao observado nos ensaios experimentais, para uma distância entre colinas de H . As medições efectuadas com a sonda de 7 furos indiciam a presença de uma pequena bolha de recirculação, a qual também foi observada através dos fios de lã, ainda que com um carácter instável. Para o caso de uma distância nula entre colinas observa-se que o modelo computacional sobrestima a localização do ponto de separação, quando comparado com as medições experimentais. Ainda para a mesma distância constata-se que a sonda de 7 furos prevê uma extensão superior da bolha de recirculação quer no vale formado entre as duas colinas quer na face de jusante da colina colocada na segunda posição.

6. CONCLUSÕES

Após a apresentação e discussão de resultados, importa agora realçar os principais aspectos e conclusões mais relevantes deste trabalho. O estudo incidiu sobre a simulação experimental e computacional do escoamento em torno de uma ou mais colinas sujeitas à erosão por acção do vento. A geometria das colinas estudadas é descrita por uma equação sinusoidal e duas configurações possíveis foram testadas, respectivamente o caso de uma colina isolada e a situação de duas similares, dispostas em tandem, e colocadas a diferentes distâncias, 0 e H . Obteve-se a distribuição da tensão tangencial ao longo da superfície das colinas, efectuou-se um estudo sobre a topologia do escoamento e mediu-se o campo de velocidades em torno das mesmas.

Verifica-se uma grande evolução no uso de ferramentas de modelação numérica de escoamentos para a caracterização da zona de recirculação em colinas onde este fenómeno ocorra, no entanto para que este tipo de abordagem seja válida têm que existir dados experimentais para suporte do modelo computacional. Neste trabalho pretendia-se avaliar o potencial de utilização da simulação numérica para previsão da distribuição do coeficiente de atrito e para identificação da zona de recirculação.

Constatou-se que, em relação à distribuição da tensão tangencial ao longo das colinas, mais concretamente para o caso da interacção entre colinas, a colocada a montante influencia claramente a de jusante, fazendo com que a segunda possua valores claramente inferiores em relação ao da anterior. A influência sobre a colina de montante, apesar de menos acentuada, também foi notória. A comparação entre os valores experimentais e numéricos mostra que há alguma discrepância em alguns dos casos estudados, sendo essa diferença mais pronunciada na colina isolada no modelo de comprimento $5H$, e na interacção de colinas $5H$ na colocada a montante. Apesar deste facto podemos afirmar que o modelo computacional prevê razoavelmente bem a distribuição do coeficiente de atrito.

Com a medição do campo de velocidade em torno das colinas, através da utilização de uma sonda de 7 furos, foi possível determinar experimentalmente a estrutura da zona de recirculação. Os resultados obtidos permitiram verificar que o perfil de

velocidade varia ao longo da colina, ficando também patente que no cume há uma forte aceleração do escoamento, facto que foi observado no caso isolado e na interacção de colinas. Estas medições permitiram também identificar os pontos de separação e de recolamento do escoamento, os quais foram comparados com os testes realizados com fios de lã e com os das simulações numéricas.

Procedeu-se à comparação dos pontos de separação e recolamento do escoamento, obtidos experimentalmente com os resultados numéricos. Observou-se que, em relação ao ponto de separação do escoamento, e para o modelo de comprimento $5H$, no caso isolado e na colina de montante na interacção entre colinas, a sua localização diferia bastante em especial entre os resultados da sonda de 7 furos e a previsão pelo modelo computacional.

A extensão da zona de recirculação no vale formado entre as duas colinas, quando estas se encontram dispostas em tandem, tende a crescer com o aumento da distância entre colinas, enquanto a extensão da bolha de recirculação no rasto da colina de jusante possui um comportamento inverso. Da comparação entre os pontos de separação e recolamento de todos os resultados obtidos podemos afirmar que essa correlação é razoavelmente satisfatória, em particular na confrontação da observação feita com fios de lã com a simulação computacional.

Conclui-se então que, de uma forma geral, a simulação numérica é uma boa ferramenta para descrever este tipo de escoamentos, susceptível de fornecer uma boa estimativa do coeficiente de atrito para seu uso em modelos de erosão por acção do vento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arya, S. P. S., Capuano, M. E., Fagen, L. C. (1987) “Some Fluid Modelling Studies of Flow and Dispersion Over Two-Dimensional Low Hills”, *Atmospheric Environment*, 21, 753-764.
- Athanassiadou, M. E., Castro, I. P. (2001) “Neutral Flow Over a Series of Rough Hills: A Laboratory Experiment”, *Boundary- Layer Meteorology*, 101, 1-30.
- Bagnold, R. (1941). “The physics of blown sand and desert dunes”, London: Mathuen.
- Belcher, S. E., Newley, T. M. J., Hunt, J. C. R. (1993) “The drag on an undulating surface induced by the flow of a turbulent boundary layer”, *Journal of Fluid Mechanics*, 249, 557-596.
- Britter, R. E., Hunt, J. C. R., Richards, K. J. (1981), “Airflow over a two dimensional hill studies of velocity speed-up, roughness effects and turbulence”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107, 91-110.
- Durbin, P. A. (1996) “Technical notes: On $K-\epsilon$ stagnation point anomaly”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17, 89-90.
- Ferreira, A. D. (1993) “Contribuição para o estudo do escoamento turbulento adiabático em torno de colinas bidimensionais”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- Finnigan, J. J., (1988) “Air Flow over Complex Terrain”, W. L. Steffen and O. T. Denmead (eds.), *Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications*, Springer-Verlag, Heidelberg, 183-229.
- Finnigan, J. J., Raupach, M. R., Bradley, E. F., Aldis, G. K. (1990) “A wind tunnel study of turbulent flow over a two-dimensional ridge”, *Boundary-Layer Meteorology*, 50, 277-317.
- Fino, R. (2011) “Estudo experimental da erosão por acção do vento de colinas sinusoidais constituídas por um material granular”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- Gong, W., Taylor, P.A., Dörnbrack A. (1996) “Turbulent boundary-layer flow over fixed aerodynamically rough two-dimensional sinusoidal waves”, *Journal Fluid Mechanics*, 312, 1-37
- Hunt, J. C. R., Leibovich, S., Richards, K. J. (1988) “Turbulent Shear Flow Over Low Hills”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, 1435-1470.
- Irwin, H.P.A.H. (1981) “A simple omnidirectional sensor for Wind – tunnel studies o pedestrian level winds”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 219-239.

- Ishihara, T., Fujino, Y., Hibi, K. (2001) “A wind tunnel study of separated flow over a two-dimensional ridge and a circular hill”, *Journal of Wind Engineering*, 89, 573-576.
- Jackson, P. S. Hunt, J. C. R. (1975) “Turbulent Wind Flow Over a Low Hill”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 929-955.
- Kim, H. G., Lee, C. M., Lim, H. C., Kyong, N. H. (1997) “An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66, 17-33.
- Launder, B. Spalding, D. (1974) “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289
- Loureiro, J. B. R., Soares, D. V., Rodrigues, J. L. R., F. T., Freire, A. P. S. (2006), “Water tank and numerical model studies of flow over steep smooth two-dimensional hills”, *Boundary-Layer Meteorology*, 122, 343-365.
- Loureiro, J. B. R., Alho, A. T. P., Freire, A. P. S. (2008) “The numerical computation of near-wall turbulent flow over a steep hill”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 540-561.
- Lun, Y. F., Mochida, A., Murakami, S., Yoshino, H., Shirasawa, T. (2003) “Numerical simulation of flow over topographic features by revised $K-\varepsilon$ models”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 231-245.
- Lun, Y. F., Mochida, A., Yoshino, S. M. (2006) “Applicability of linear type $K-\varepsilon$ models to flow over topographic features”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 371-384.
- Mason, P. J., Sykes, R. L. (1979) “Flow over an isolated hill of moderate slope”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105, 383-395.
- Nagano, Y., Hattori, H., (2003), “A new low-reynolds-number turbulence model with hybrid time scales of mean flow and turbulence for complex wall flows”, *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Antalya, Turkey, October 12-17.
- Shih, T. H., Zhu, J., Lumely, J.L. (1995) “A new Reynolds stress algebraic equation model”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 125, 287-302
- Silva, M.C.G., Pereira, C. A. C., Cruz, J. M. S. (2003) “On the use of a linear interpolation method in the measurement procedure of a seven-hole pressure probe”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 1-8.
- Stangroom, P., (2004), “CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain”, Thesis submitted To The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy.
- Zheng, X. (2009), “Mechanics of Wind-blow sand Movements”, Verlag, Springer

<http://www.ansys.com/>

8. COMPARAÇÃO DA TOPOLOGIA DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA OU MAIS COLINAS

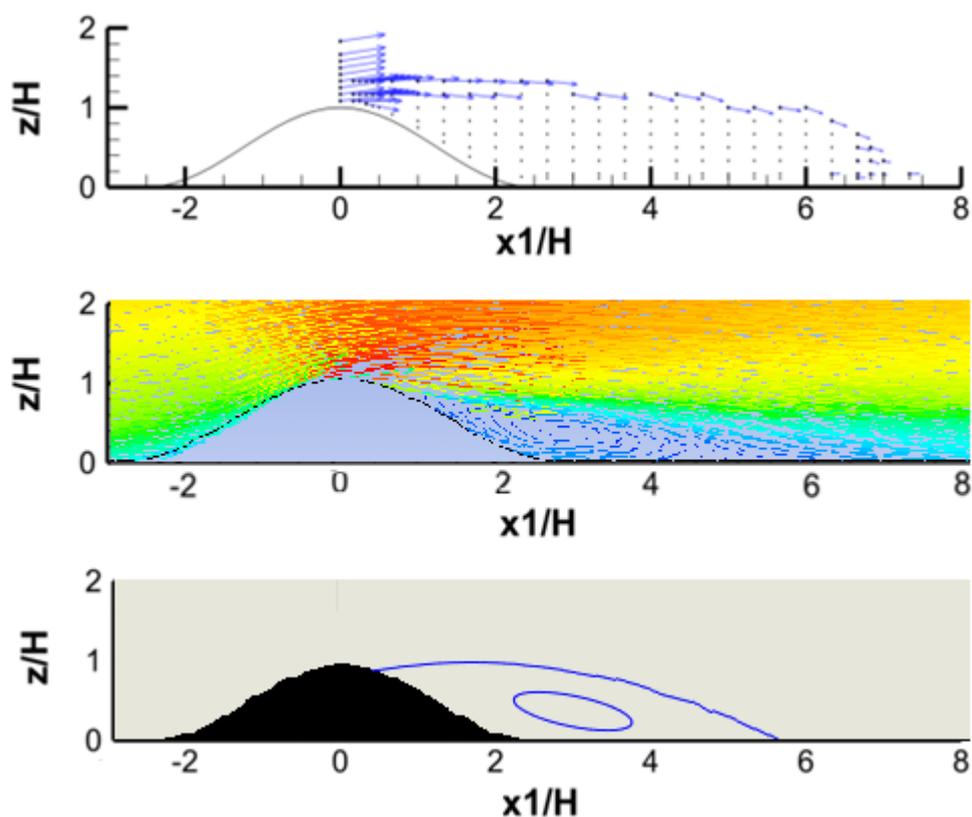


Figura 38 - Representação ilustrativa do escoamento em torno do modelo $5H$ isolado, para uma velocidade $U_0 = 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.

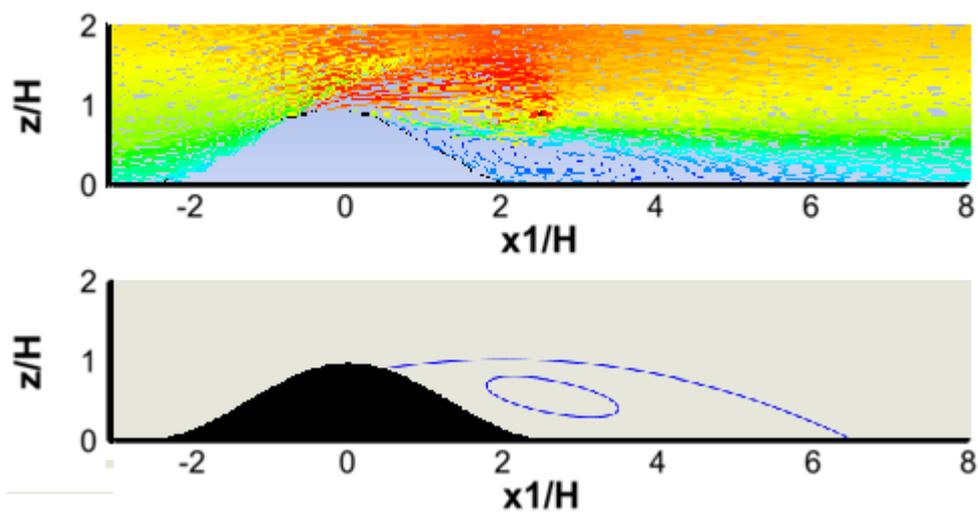


Figura 39 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de o modelo $5H$ isolado, para uma velocidade $U_0=9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lâ.

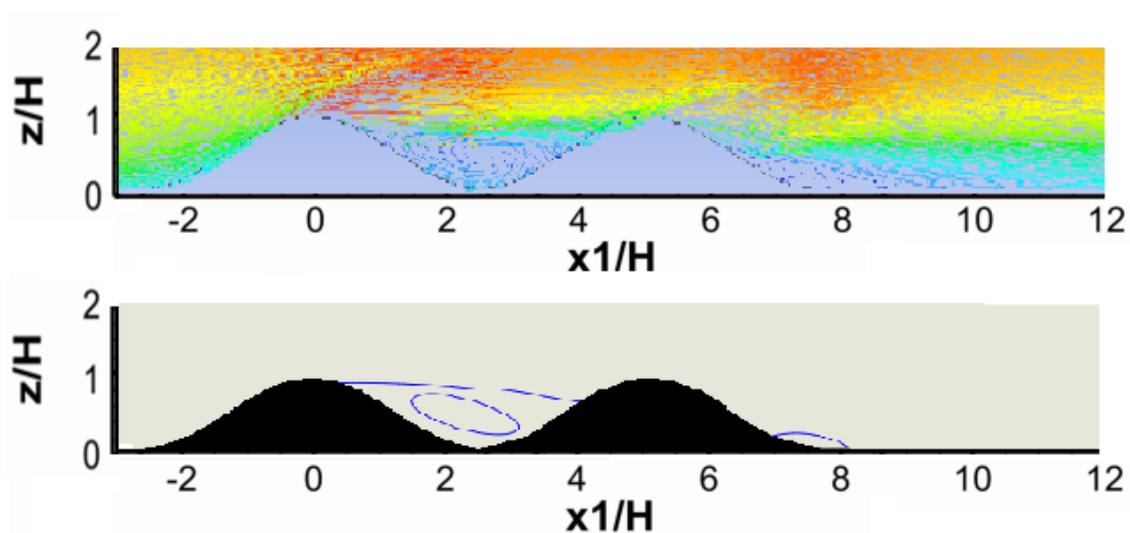


Figura 40 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0=8.3$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lâ.

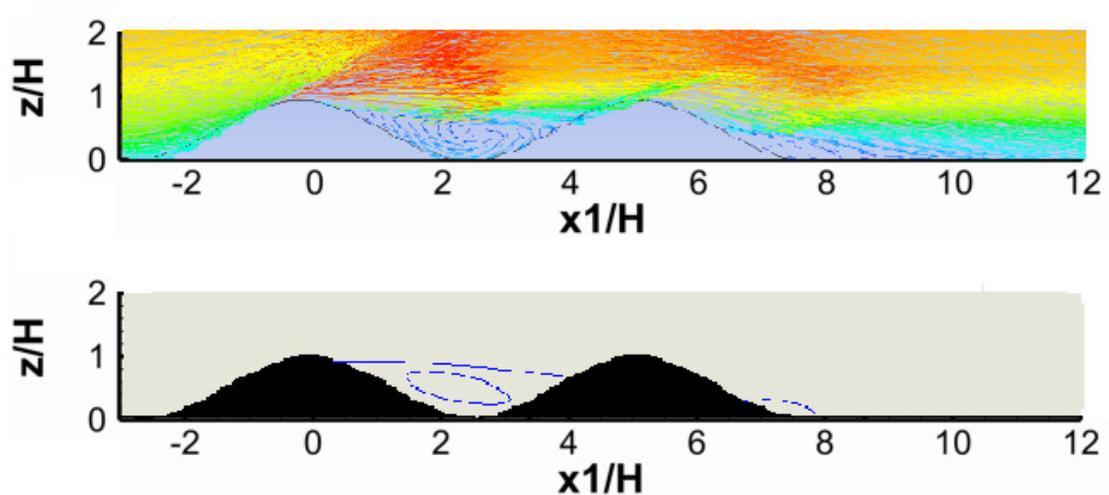


Figura 41 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas nula, $U_0=9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lâ.

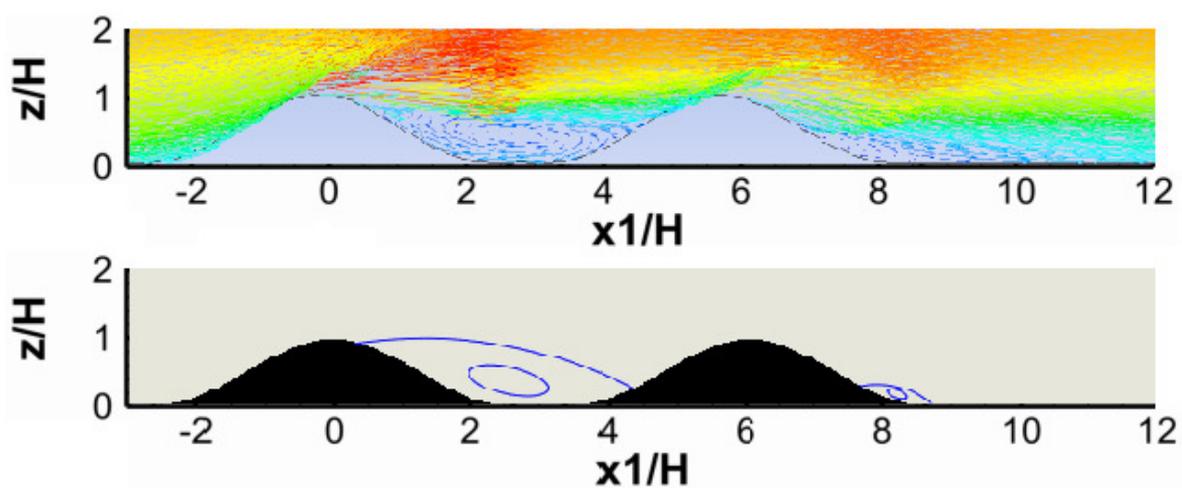


Figura 42 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0=8.3$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lâ

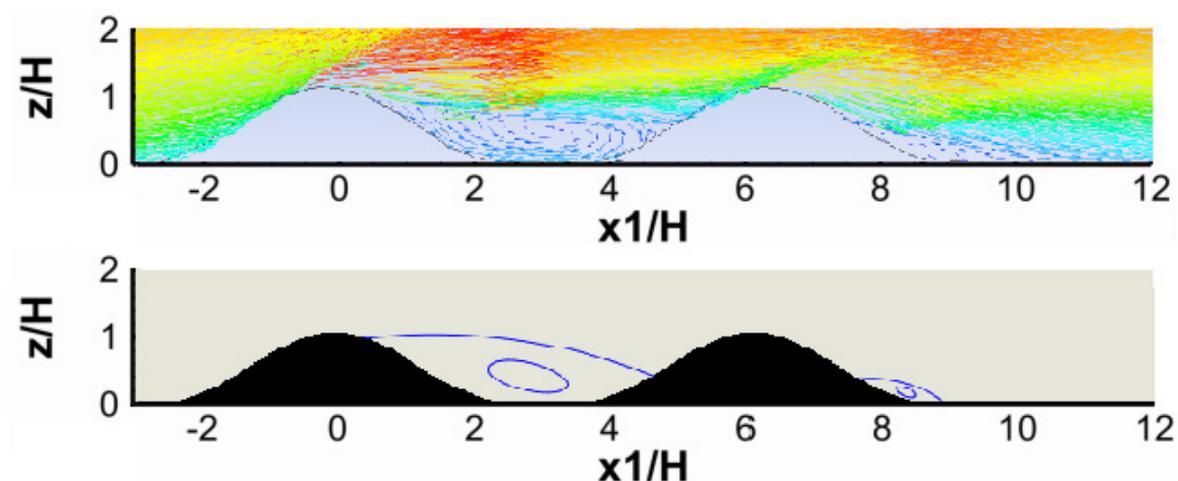


Figura 43 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $5H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0 = 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.

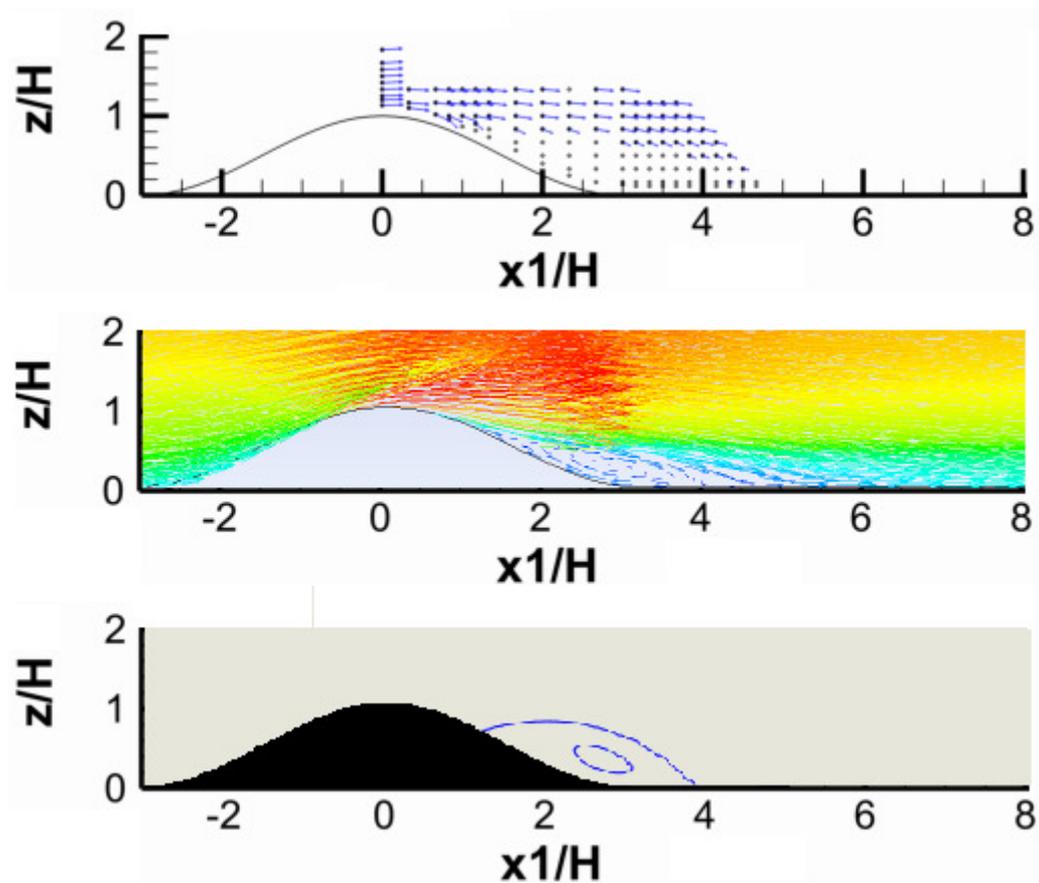


Figura 44 - Representação ilustrativa do escoamento em torno do modelo $6H$ isolado, para uma velocidade $U_0 = 8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.

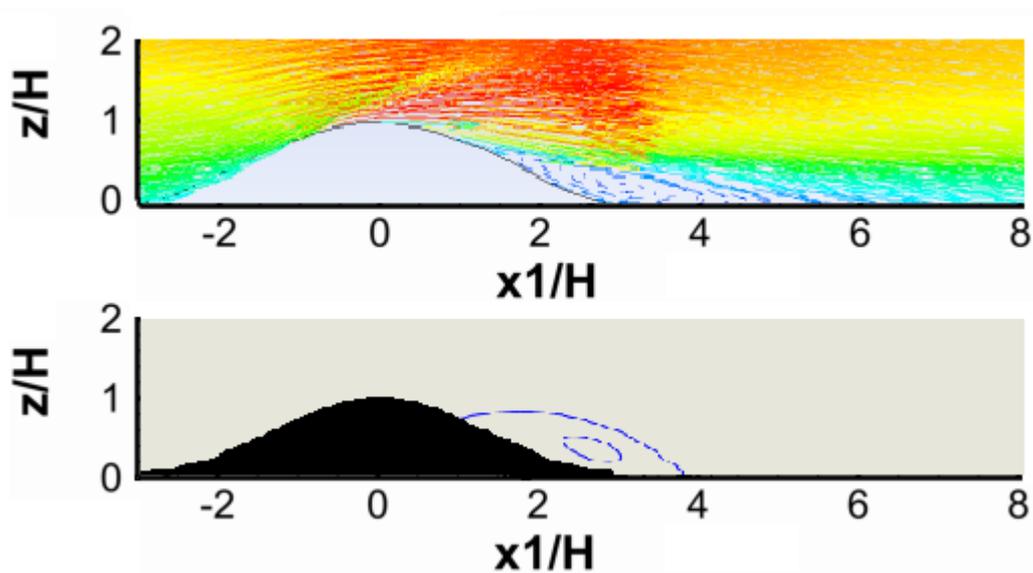


Figura 45 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de o modelo $6H$ isolado, para uma velocidade $U_0=9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.

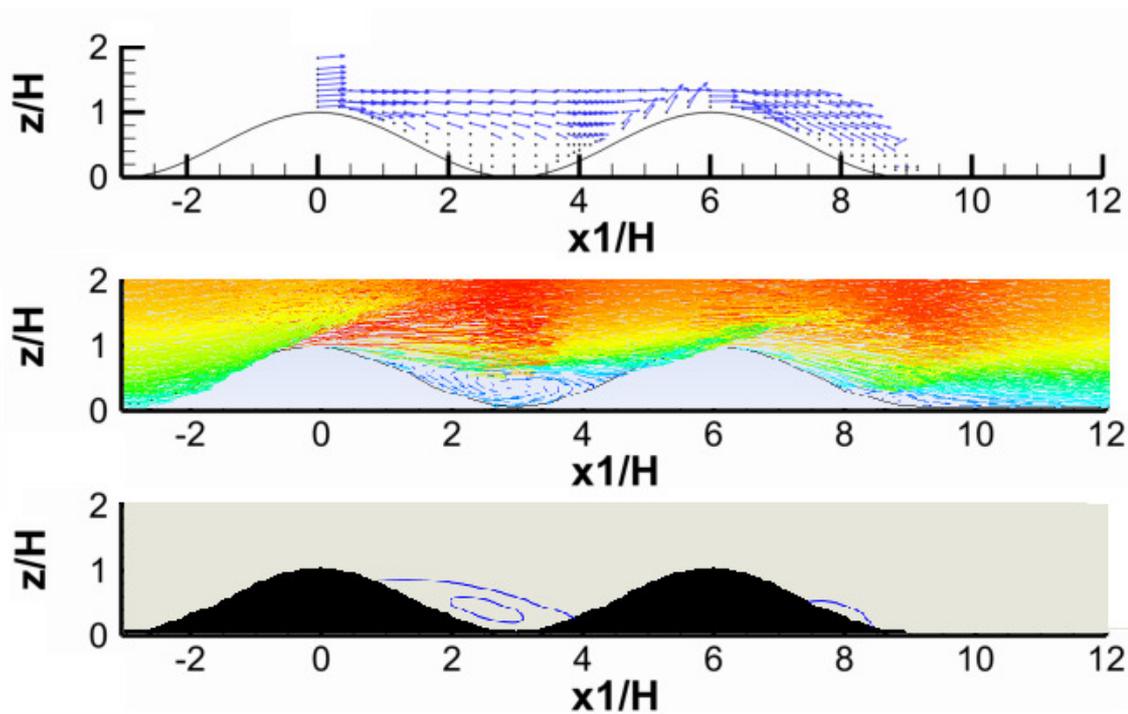


Figura 46 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0=8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lã.

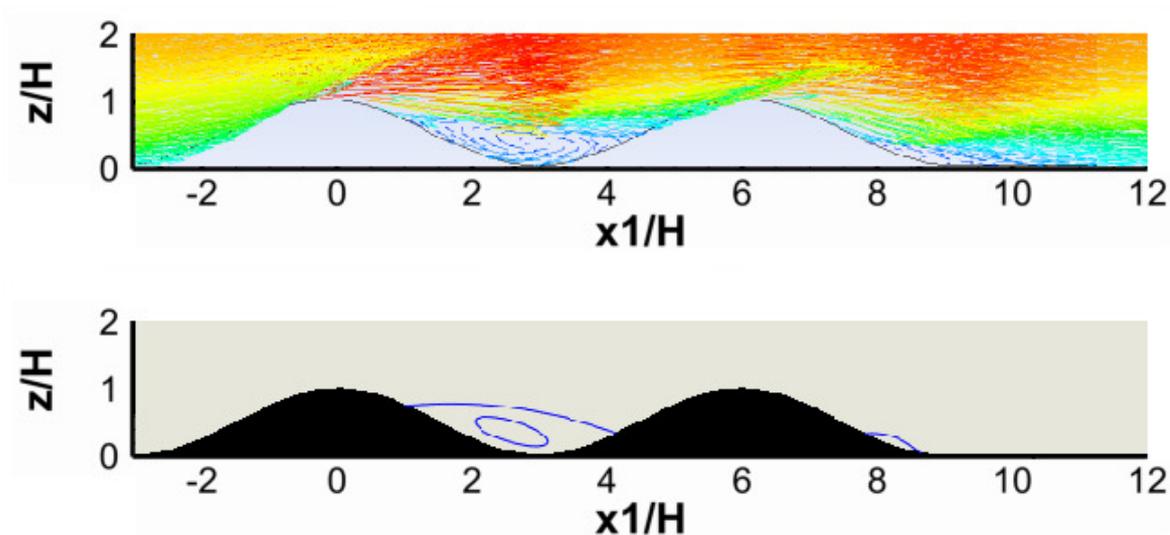


Figura 47 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância nula entre colinas, $U_0=9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lâ.

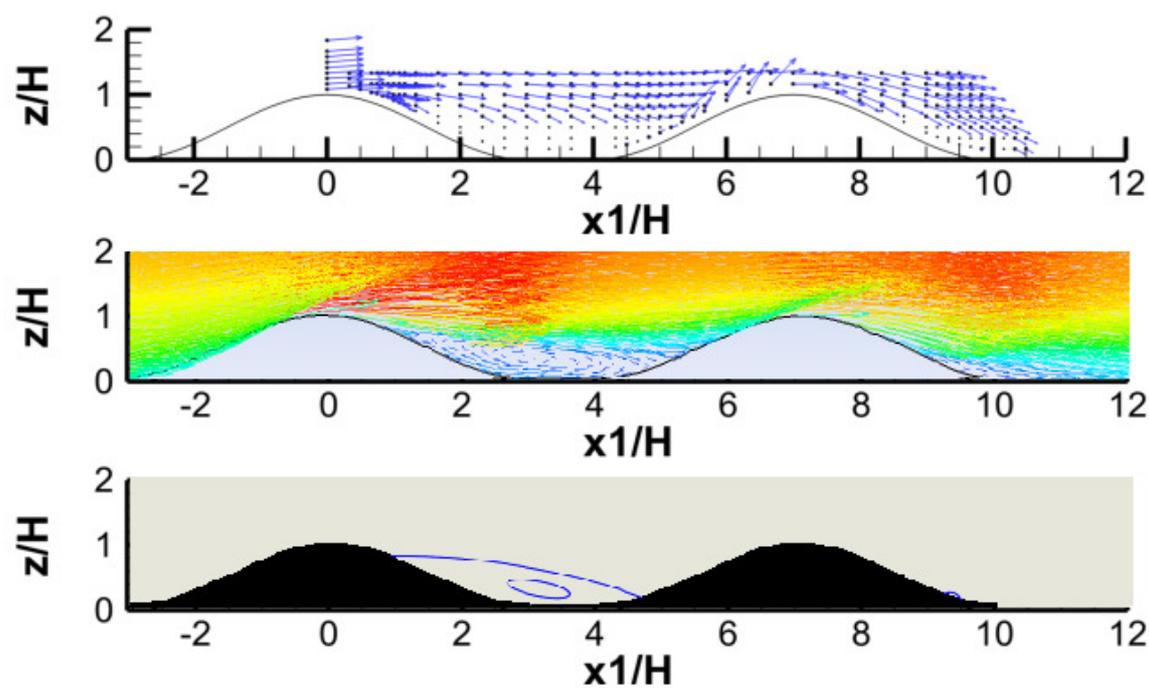


Figura 48 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0=8.3$ m/s. De cima para baixo: sonda de 7 furos, simulação numérica, fios de lâ.

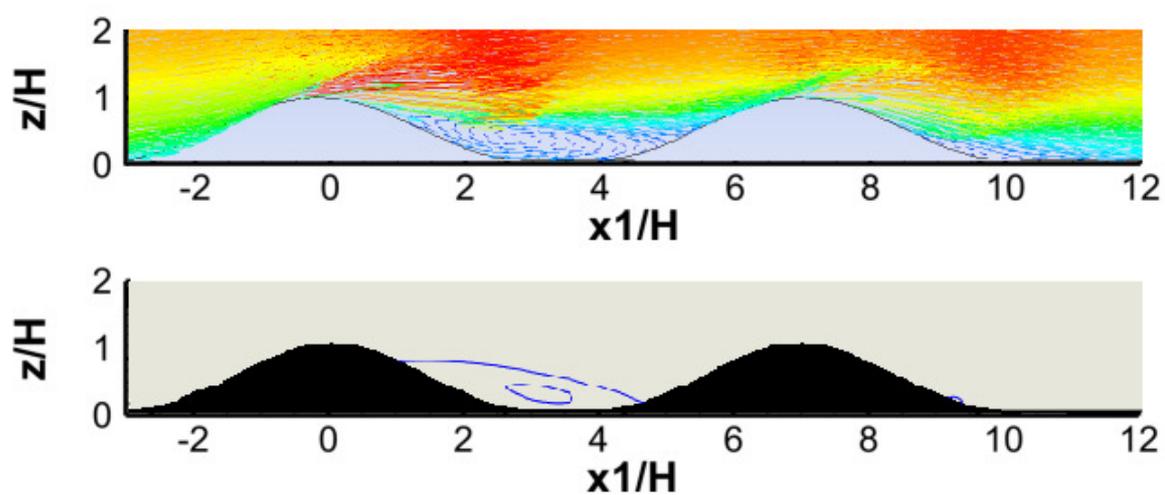


Figura 49 - Representação ilustrativa do escoamento em torno de duas colinas $6H$ dispostas em tandem, para uma distância entre colinas H , $U_0 = 9.1$ m/s. De cima para baixo: simulação numérica, fios de lã.

