



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo das alterações de escoamento em torno de pilhas cónicas em função da sua erosão**

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

**Autor**

**Isabel Maria Neves Nunes**

**Orientador**

**Almerindo Domingues Ferreira**

**Júri**

**Presidente Professor Doutor Luís Adriano Oliveira**

**Vogal Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes**

**Coimbra, Setembro, 2010**

## Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não devo, nem posso deixar de prestar o meu reconhecimento e gratidão. Na impossibilidade de agradecer a todos os que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e académico, gostaria de agradecer a algumas pessoas em particular:

Ao meu orientador, Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pelo apoio, orientação, disponibilidade e acima de tudo por ter acreditado em mim.

Ao colega e companheiro de “gabinete” João Sismeiro, pelos dados experimentais que disponibilizou, pela companhia e pela ajuda prestada em tantas outras situações.

Ao João, por tudo, pelo apoio, força e carinho, pelo Amigo a tempo inteiro.

À Tânia, ao Pedro, ao João Vitor e ao Diogo pelo apoio nas últimas e complicadas semanas.

A todos os amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e académica, por todos os bons momentos e recordações que me permitem levar comigo.

Por último, mas mais importante que tudo, aos meus Pais, pelo carinho, apoio incondicional, pela formação que me proporcionaram, pelo orgulho que me fazem sentir e exemplo que me fazem querer seguir. Por TUDO.

A todos, o meu MUITO OBRIGADA.

## Resumo

Embora dependente de muitos parâmetros, a erosão por acção do vento é fundamentalmente condicionada pela velocidade do vento.

O estudo foca a simulação numérica do escoamento em torno de uma pilha de armazenamento erodida, tomando por base os casos experimentais testados. Esses casos são os da pilha desprotegida, pilha protegida por quebra-ventos sólidos, situados a diferentes distâncias (H, 2H, 3H, 4H) e com orientações  $\gamma = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  e  $40^\circ$ , e ainda os casos de pilhas protegidas por barreiras com 70% de porosidade e  $\gamma = 20^\circ$  e  $40^\circ$ , situadas às distâncias H e 2H, sendo H a altura da pilha.

Pretende-se avaliar o potencial de utilização da simulação computacional na previsão do escoamento na proximidade da superfície da pilha sujeita à erosão. Para tal, correlaciona-se o fluxo erodido com a velocidade prevista numericamente, em diferentes situações.

Constata-se de uma forma geral, que a simulação numérica é uma boa ferramenta para investigação destas situações, capaz de fornecer uma boa estimativa para a velocidade esperada na proximidade da pilha. A informação obtida através do CFD pode assim ser usada para estimar o potencial de erosão.

**Palavras-chave:** Erosão pelo vento, velocidade do vento, pilha de armazenamento, quebra-ventos, potencial de erosão, simulação numérica.

## Abstract

Although dependent on many parameters, the wind erosion is fundamentally dependent on the wind speed.

The study focuses the numerical simulation of flow around an eroded storage pile, based on experimental tested cases. These cases are the pile unprotected, the pile protected by solid windbreaks situated at different distances ( $H$ ,  $2H$ ,  $3H$ ,  $4H$ ) and orientations  $\gamma = 0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  and  $40^\circ$ , and even cases of pile-protected barriers with 70% porosity and  $\gamma = 20^\circ$  and  $40^\circ$ , located at distances  $H$  and  $2H$ .

It is intended to evaluate the computer simulation potential to predict the flow near the eroded pile surface. To this end, the eroded flow is correlated with the numerically provided speed, in different situations.

It's ascertained that the numerical simulation is a good tool for the investigation of these situations, which can provide a good estimate for the expected speed in the pile vicinity.

Therefore, the information obtained through the CFD can be used to estimate the potential for erosion.

**Keywords** Wind erosion, wind speed, storage pile, windbreaks, potential of erosion, numerical simulation.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas .....	viii
Simbologia.....	viii
Siglas .....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do tema .....	2
1.2. Motivação .....	4
1.3. Estrutura do relatório .....	5
2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	7
2.1. Geometria.....	7
2.1.1. Simetria.....	8
2.2. Geração da malha.....	10
2.3. Pré – Processamento .....	12
2.3.1. Domínio .....	12
2.3.2. Modelo de turbulência .....	12
2.3.3. Condições de fronteira .....	13
2.4. Resolução das equações.....	15
2.5. Pós-Processamento .....	16
3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	21
3.1. Evolução temporal da deformação da pilha exposta a 20 minutos de erosão.....	21
3.2. Pilha protegida por barreiras sólidas .....	23
3.3. Pilha protegida por barreiras porosas.....	26
4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NO FLUXO DO MATERIAL GRANULAR... ..	29
5. CONCLUSÃO.....	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Pilha exposta à erosão no instante $t=0$ minutos, $H=110$ mm e $D=340$ mm.....	7
Figura 2 - Domínio de escoamento para o caso de uma pilha protegida por barreira com 70% de porosidade situada à distancia de $1H$ e com ângulo de $20^\circ$ com a direcção do escoamento. ....	8
Figura 3 - Velocidade do vento ( $u_s/u_r$ ) à distância de 2,5 mm da superfície da pilha, para os três casos em questão. a) a preto a pilha real; b) a verde a pilha simétrica segundo o eixo longitudinal; c) a vermelho tracejado meia pilha para a simulação de metade domínio (simetria Longitudinal).....	9
Figura 4 - Geração da malha, para o caso da simulação de uma pilha protegida por um quebra-vento sólido, situado à distância de $3H$ ( $H=110$ mm), no instante $t=0$ minutos. ....	11
Figura 5 - Gráficos da convergência de resíduos, relativos à conservação da massa e quantidade de movimento (à esquerda), e às propriedades do modelo de turbulência ( $k-\epsilon$ ) (à direita).....	15
Figura 6 - Velocidade a 2.5mm da superfície da pilha desprotegida, no instante $t=0$ minutos. ....	16
Figura 7 - Velocidade a 2.5mm da superfície da pilha protegida por uma barreira sólida situada à distância $H$ ( $H=110$ mm). ....	17
Figura 8 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância $H$ com orientação de $10^\circ$ com a direcção do escoamento incidente. ....	17
Figura 9 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância $H$ com orientação de $20^\circ$ com a direcção do escoamento incidente. ....	18
Figura 10 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância $H$ com orientação de $40^\circ$ com a direcção do escoamento incidente. ....	18
Figura 11 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira com 70% de porosidade, situada a uma distância $H$ , com orientação de $20^\circ$ com a direcção do escoamento incidente.....	19
Figura 12 - Representação da velocidade num plano de simetria vertical, na simulação de uma pilha protegida por uma barreira sólida, situada à distância $H$ , com inclinação de $10^\circ$ com a direcção do escoamento incidente. ....	19
Figura 13 – Velocidade do escoamento ( $u_s/u_r$ ) nos instantes $t=0, 2, 3, 4$ minutos, respectivamente. ....	21
Figura 14 - Velocidade do escoamento ( $u_s/u_r$ ), no instante $t=5, 10, 15$ e $20$ minutos, respectivamente .....	22
Figura 15 - Esquema representativo das diferentes posições da barreira sólida com orientação, $\gamma=0^\circ$ , com a direcção do escoamento. ....	23
Figura 16 - Velocidade ( $u_s/u_r$ ), na proximidade da superfície da pilha, no instante $t=0$ minutos, para os casos da barreira situada a uma distância $H, 2H, 3H$ e $4H$ , respectivamente. ....	23

---

Figura 17 - Esquema representativo dos diferentes ângulos considerados para o escoamento em pilhas protegidas por barreiras sólidas adaptada de Sismeiro (2010).....	24
Figura 18 - Velocidade ( $u_s/u_r$ ) na proximidade da superfície da pilha, para os casos da barreira sólida situada a uma distância H, e com as orientações de 10, 20 e 40°.....	24
Figura 19 - Velocidade do escoamento ( $u_s/u_r$ ) na proximidade da superfície da pilha protegida com barreira sólida situada a uma distância 2H, com orientações de 10, 20 e 40°, respectivamente. ....	25
Figura 20 – Velocidade do escoamento ( $u_s/u_r$ ) a 2.5mm da superfície da pilha, protegida por barreira porosa situadas às distâncias H e 2H, com orientação de 20 e 40°, respectivamente. ....	26
Figura 21 - Distribuição do fluxo de material ao longo do eixo x.....	29
Figura 22 - Evolução do fluxo em função da velocidade média na proximidade da pilha desprotegida.....	31
Figura 23 - Evolução do fluxo de material erodido em função da velocidade média à superfície, para o caso da pilha desprotegida. ....	32
Figura 24 - Gráfico da evolução do fluxo em função da velocidade média, para o caso da pilha protegida por uma barreira sólida, colocada a uma distância de 2H. ....	33
Figura 25 - Evolução do fluxo ao longo do eixo das abcissas, para o caso da pilha protegida por barreira sólida, situada uma distância de 2H.....	34
Figura 26 – Correlação entre o fluxo de material e a velocidade prevista na proximidade da superfície de uma pilha protegida por barreira sólida colocada a uma distância de 2H com orientação de 20°, nos dois primeiros minutos de erosão.....	34
Figura 27 - Apresentação do fluxo segundo valores de y para o caso da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância de 2H, com orientação de 20°.....	35
Figura 28 – Correlação do Fluxo de material erodido e da velocidade média, para o caso da pilha protegida por barreira porosa, situada a uma distância 2H, com orientação de 20°... ..	35
Figura 29 - Evolução do fluxo do material ao longo do seu eixo longitudinal, para o caso da pilha protegida por barreira porosa, situada a uma distância de 2H e com 20° de inclinação com a direcção do vento.....	36

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para a geração da malha. ....	11
Tabela 2 - Características do domínio do fluido.....	12
Tabela 3 - Características das condições de fronteira na entrada. ....	13
Tabela 4 - Características das condições de fronteira na saída.....	13
Tabela 5 - Características das condições de fronteira da zona Norte, Sul e Topo.....	13
Tabela 6 - Características das condições de fronteira da base, da pilha e da barreira sólida. .....	14
Tabela 7 - Características das condições de fronteira da barreira porosa.....	14
Tabela 8 - Continuação das características das condições da barreira porosa.....	14
Tabela 9 - Critérios de convergência para a resolução das equações no CFX-Solver. ....	15

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$U_0$  – Velocidade do escoamento não perturbado

$u_*$  - Velocidade de atrito

$u_{*t}$  – Velocidade mínima de atrito

$H$  – Altura da pilha

$P$  – Potencial de erosão

$d$  – Diâmetro médio das partículas

$u$  – Componente longitudinal da velocidade

$\alpha$  – Expoente da Lei da Potência

$\gamma$  – Ângulo de orientação das barreiras

$\delta$  – Espessura da camada limite

$\varphi$  - Porosidade da barreira

### Siglas

CFD – Computational Fluid Dynamics

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EPA - Environmental Protection Agency

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

## 1. INTRODUÇÃO

A elaboração da presente dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica apresenta como tema: O estudo das alterações do escoamento em torno de pilhas cónicas em função da sua erosão. Torna-se importante antes de desenvolver o tema em questão, abordar alguns conceitos e fundamentos teóricos para uma melhor compreensão do mesmo.

De um modo geral, erosão é um conceito frequentemente utilizado. Entendamos como erosão do vento, ou eólica, o conjunto de processos, como o arranque, transporte e acumulação de partículas e/ou poeiras, por consequência directa da acção do vento. O transporte de partículas por acção do vento envolve a sua elevação da superfície da pilha, dispersão atmosférica, e a sua deposição novamente na superfície da pilha ou em zonas afastadas desta.

É em zonas áridas, com pouca vegetação como os desertos, que mais se verifica a erosão eólica. No entanto, também em ambientes industriais, onde haja o armazenamento de grandes quantidades de materiais granulares, como por exemplo carvão, torna-se necessário avaliar os problemas ambientais acarretados pelas poeiras geradas, mas também problemas operacionais e económicos, dado a quantidade de material passível de ser arrastado.

Trata-se de um estudo complexo, devido à quantidade de parâmetros que devem ser tidos em conta, tais como as características do vento, a geometria das pilhas, as alterações da superfícies, os parâmetros das partículas, possíveis protecções para as mesmas, etc. Ao longo do tempo, tem-se recorrido a protecções para as pilhas, barreiras naturais como - árvores ou arbustos, bem como barreiras artificiais como cercas ou vedações, para diminuir as consequências da erosão de pilhas de armazenamento.

A presente dissertação tem como objectivo principal analisar a evolução temporal do escoamento em torno de pilhas de armazenamento, estudo feito com base na modelação computacional, partindo de medições experimentais, anteriormente realizadas da forma das pilhas.

O estudo inclui a simulação dos casos de pilhas expostas, bem como de pilhas protegidas por quebra-ventos colocados em diferentes posições (várias distâncias à pilha e ângulos de orientação) e com diferentes porosidades.

O software usado para a modelação computacional foi o CFX, versão 11, da *Ansys*.

Por fim, é correlacionada a velocidade, prevista, na proximidade da superfície das pilhas, com a quantidade medida de partículas arrastadas.

## **1.1. Enquadramento do tema**

Este subcapítulo dirige-se ao enquadramento do tema em questão, de modo a avaliar a continuidade e evolução dos trabalhos realizados até à data.

No estudo da erosão de pilhas de armazenamento é abordado paralelamente o método experimental e computacional, de modo a uma melhor compreensão do que já foi estudado. No entanto, o tema em questão foca-se na componente computacional, uma vez que a parte experimental já foi realizada e será utilizada como ponto de partida, dado a geometria da pilha ser importada a partir das medições efectuadas, sendo aquela informação usada para correlação com a informação da simulação numérica.

A abordagem das consequências da erosão eólica há muito que começou a ser considerada, sendo Bagnold (1941) um dos que mais significativamente contribuiu para o estudo da deformação da superfície por transporte de material granular. O seu estudo centrou-se em observações de zonas áridas, ensaios experimentais em túnel de vento, e análise de processos físicos do escoamento.

Zingg (1952) centrou-se na circulação de materiais sedimentares e saltação das partículas, recorrendo a ensaios no túnel de vento. Posteriormente, Kind (1990) aprofundou o processo de saltação das partículas, utilizando neve e areia como material. Gillette (1974) aprofundou a importância da velocidade do vento na erosão dos solos, realizando vários ensaios experimentais em túnel de vento.

Uma vez que a erosão pelo vento pode ser reduzida por barreiras ou quebra – ventos colocados na proximidade das pilhas, os seguintes passos foram importantes, na medida em que os estudos sobre a existência destes, provou a sua influência na diminuição

da velocidade do vento, e conseqüentemente, a diminuição da remoção de partículas da superfície das pilhas.

Stander e Arya (1988) testaram experimentalmente, em túnel de vento, a influência de quebra-ventos com diferentes porosidades, alturas e distância entre estes e as pilhas, medindo as velocidades do escoamento em torno destas, através de modelos equipados com termistores.

Borges e Viegas (1988) investigam pilhas de carvão protegidas por barreiras porosas, através da medição da velocidade no rasto da barreira, e afirmam que estas apresentam boas soluções embora menos eficientes para a protecção de grandes áreas.

Perera (1981) também testara vários tipos de barreiras artificiais, afirmando que a recirculação formada atrás destas desaparece quando a porosidade das mesmas é superior a 30%.

Raine e Stevenson (1977) testaram barreiras com porosidades de 0%, 20%, 34% e 50%, medindo a velocidade do vento e concluíram que as barreiras com 20% de porosidade apresentavam a maior redução da velocidade do vento.

Lee e Park (1998 e 1999) investigaram as variações de pressão na superfície de um prisma triangular protegido por barreiras com diferentes porosidades, com diferentes alturas e diferentes distâncias entre estas e o prisma.

Lee e Kim (1998 e 1999) realizaram testes em barreiras porosas, usando o método PTV (Particle Tracking Velocimetry), obtendo registos da turbulência e a distribuição da velocidade. Constataram que as barreiras com porosidade de 20% apresentavam a maior redução da velocidade e que as barreiras com porosidades de 40% para além de reduzirem a velocidade do vento também diminuía a turbulência no rasto da barreira.

Badr e Harion (2005) recorrendo a ferramentas de modelação numérica, simularam o escoamento em torno de pilhas de armazenamento e estudaram a emissão de poeiras emitidas, em pilhas com duas geometrias e diferentes direcções do vento.

Um estudo da EPA (2006) (Environmental Protection Agency), apresenta uma previsão da quantidade de poeiras emitidas como consequência directa da acção do vento e tem servido de base de comparação para vários estudos.

Este estudo é abordado novamente por Torão et al. (2007 e 2009), através de modelação numérica em CFD (Computational Fluid Dynamics), sendo simulado o

escoamento em torno de pilhas de armazenamento protegidas por barreiras, onde constataram que a utilização de barreiras sólidas podia reduzir em 66% a emissão de poeiras e ainda que a forma das pilhas também pode alterar a emissão. Este estudo é comparado com os resultados sugeridos em EPA.

Ferreira e Lambert (2010) realizaram testes experimentais em túnel de vento, bem como a modelação numérica do escoamento em torno de pilhas cónicas, expostas ou protegidas por quebra-ventos porosos, tendo estabelecido também comparações com o estudo da EPA. Consideraram pilhas protegidas por barreiras de diferentes porosidades, e variaram a distância entre as pilhas e as barreiras. Foram comparados resultados de testes em túnel de vento com os da modelação numérica (CFD), estabelecendo a correlação entre a velocidade nas proximidades da superfície das pilhas e a quantidade de material erodido.

Com a introdução de software de modelação numérica de escoamentos, torna-se mais rápida, e expedita a análise dos diversos casos, embora seja necessário validar a metodologia através da comparação com os resultados experimentais. Neste trabalho, partindo dos dados experimentais, obtidos em túnel de vento por Sismeiro (2010), analisa-se a evolução temporal do escoamento em torno de pilhas de armazenamento, com forma inicial cónica.

## **1.2. Motivação**

A poluição atmosférica é um problema ambiental, e o transporte de poeiras por acção do vento, não só em zonas áridas como desertos, mas também em zonas agrícolas com pouca vegetação, ou em zonas industriais, contribui bastante para que este se torne assim um problema global.

Em particular em zonas industriais nas quais se verifica o armazenamento, a céu aberto, de grandes quantidades de material granular (ex: carvão, areia), este é um problema não só ambiental, mas também económico dada a perda de material com valor.

Vários estudos continuam a realizar-se, utilizando barreiras naturais ou artificiais, considerando várias geometrias para as pilhas de armazenamento, para que se

possa controlar a erosão pelo vento, e assim mitigar os efeitos nocivos para a saúde pública e ambiental.

Os resultados de testes em túnel de vento tornam-se bastante importantes neste estudo, mas ainda assim dispendiosos. É assim importante avaliar as potencialidades da modelação numérica, através da simulação computacional da dinâmica de fluidos (*CFD*), quando aplicada neste tipo de estudos.

### **1.3. Estrutura do relatório**

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco partes. No presente capítulo, fez-se uma abordagem geral do tema, e o enquadramento teórico do mesmo, e realçam-se os motivos para a sua importância. No segundo capítulo, é explicado todo o processo envolvente à modelação computacional, desde a construção do modelo ao tratamento de resultados.

No capítulo três apresentam-se os resultados dos vários casos simulados, nomeadamente a velocidade prevista na proximidade da superfície, para as diversas situações.

No capítulo quatro relaciona-se a velocidade do escoamento na proximidade da pilha com a quantidade de material erodido.

No último capítulo, são realçadas as conclusões mais importantes deste trabalho.



## 2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a simulação numérica foi utilizado um programa de simulação (*CFX*) *Ansys* 11.0. A utilização do programa, está “subdividida” em várias etapas:

- Geometria, *Design Modeler*
- Geração da malha, *Meshing*
- Pré-Processamento, *CFX- Pre*
- Resolução das equações, *CFX- Solver*
- Pós-Processamento, *CFX-Post*

### 2.1. Geometria

Esta primeira etapa foca tudo o que envolve a geometria do modelo a estudar. Neste trabalho, a geometria foi construída recorrendo a outro software (*SolidWorks*). A construção do modelo foi baseada em medições das cotas da pilha erodida, no túnel de vento, reproduzindo-se assim a geometria real.

Reproduziram-se todos os casos experimentalmente testados no túnel de vento, podendo assim avaliar a evolução temporal do escoamento em torno das pilhas.

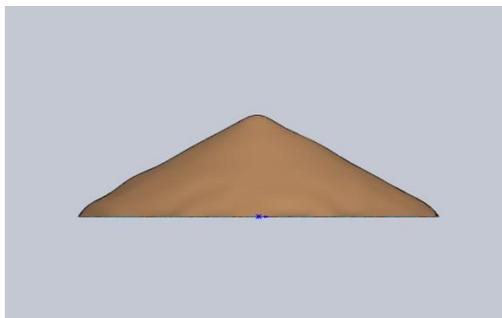
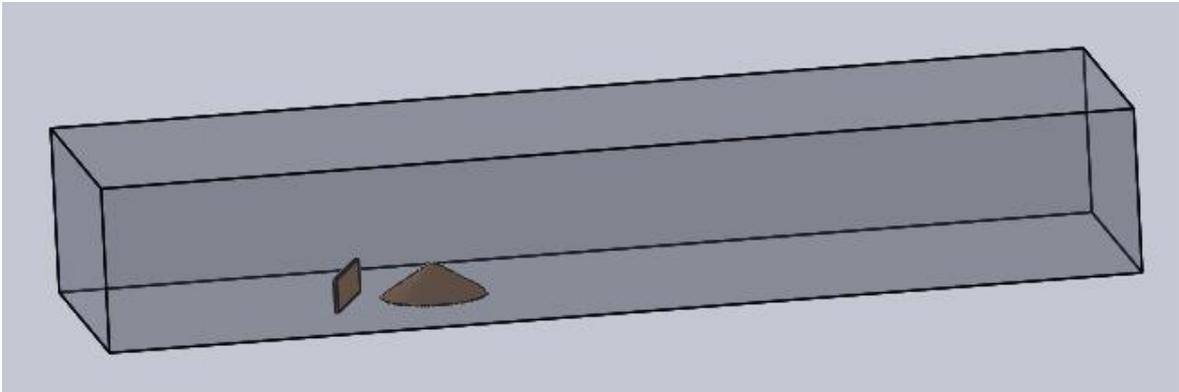


Figura 1 - Pilha exposta à erosão no instante  $t=0$  minutos,  $H=110$  mm e  $D=340$  mm.

Após a construção dos vários modelos, foram construídos os domínios do escoamento para as respectivas simulações, como podemos verificar na Figura 2:



**Figura 2 - Domínio de cálculo para o caso de uma pilha protegida por barreira com 70% de porosidade situada à distancia de  $1H$  e com ângulo de  $20^\circ$  com a direcção do escoamento.**

As medidas do domínio são precisamente,  $31H$  de comprimento,  $10H$  de largura e  $5H$  de altura, sendo  $H$  a altura da pilha não deformada.

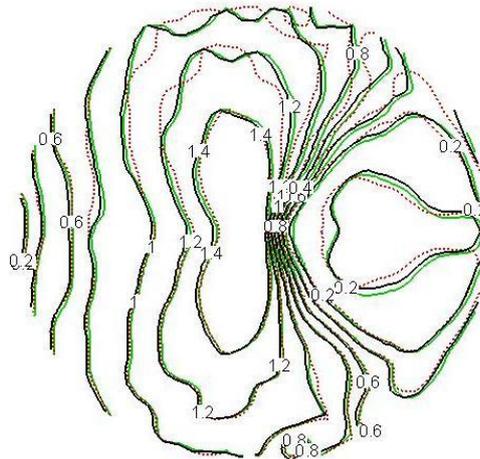
Foram construídos os domínios do escoamento das pilhas protegidas por barreiras situadas às distâncias,  $1H$ ,  $2H$ ,  $3H$ ,  $4H$ , medidas entre a barreira e a base da pilha e também com diferentes ângulos  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ .

### **2.1.1. Simetria**

Associadas a um escoamento turbulento estão trajectórias aparentemente aleatórias e caóticas, assim como a formação de vórtices. É devido à existência destes, uma vez que podem influenciar os padrões de velocidade em torno das pilhas, que são comparados os próximos casos. Inicialmente foram simulados casos com simetria segundo o plano longitudinal; no entanto, devido à formação de vórtices, esta pode não ser considerada correctamente, embora funcionasse apenas como simplificação, pois pouparia tempo nas simulações.

Foram então simulados os seguintes casos:

- Pilha real completa
- Pilha simétrica segundo o eixo longitudinal
- Metade da pilha e metade do domínio, simetria em relação ao eixo longitudinal



**Figura 3 - Velocidade do vento ( $u_s/u_r$ ) à distância de 2,5 mm da superfície da pilha, para os três casos em questão. a) a preto a pilha real; b) a verde a pilha simétrica segundo o eixo longitudinal; c) a vermelho tracejado meia pilha para a simulação de metade domínio (simetria Longitudinal).**

A velocidade do vento referenciada na Figura 3, é um parâmetro adimensional que resulta do quociente ( $u_s/u_r$ ), sendo que  $u_s$  representa a velocidade na superfície a 2.5 mm da pilha, e  $u_r$  a velocidade de referência do vento medida a uma altura de 100 mm, valores à escala de 1:100, sugeridos em EPA (2006).

Pode constatar-se na Figura 3 que existem algumas diferenças, nas linhas da velocidade, sendo que para um estudo mais objectivo deve ser considerada a totalidade da pilha. No entanto a simplificação, optando pela simetria segundo o plano longitudinal, na qual se simularia apenas metade do domínio não seria errada, pois não se verificam diferenças significativas nos vários níveis de velocidades.

Uma vez que, para todos os casos das pilhas protegidas por barreiras, é necessário simular um domínio completo, sem considerar simetria, opta-se então, no caso das simulações de pilhas expostas, também por simular toda a pilha, de modo a manter uma maior coerência em todos os casos.

## 2.2. Geração da malha

A geração de uma malha tem associados vários parâmetros, que devem assumir diferentes valores para cada problema físico a estudar, como por exemplo, o tipo de escoamento, a geometria do domínio, etc.

De um modo geral, a geração da malha consiste numa divisão do domínio, em volumes bastante pequenos, (por exemplo tetraedros e hexaedros, no caso de uma geração de malha 3D, e triângulos ou quadriláteros no caso de uma geração da malha 2D), isto para que as equações sejam discretizadas nestes elementos. Pode então afirmar-se que uma malha mais refinada (menores dimensões dos volumes), poderá tornar a simulação mais demorada, mas também mais precisa e aproximada à situação real, em especial nas zonas mais refinadas.

Para a geração das malhas podem distinguir-se dois métodos: métodos numéricos e métodos algébricos. Os métodos numéricos baseiam-se na resolução de equações diferenciais que exprimem uma relação matemática entre as coordenadas cartesianas e as coordenadas deformadas. Caracterizam-se por uma boa robustez e universalidade, capazes de gerar malhas bastante apropriadas para o cálculo numérico de escoamentos. Por sua vez, os métodos algébricos utilizam funções de interpolação para o cálculo das coordenadas dos nós da malha, no interior do domínio. São utilizados principalmente para casos em que o regime do escoamento é transitório, e em que a forma das fronteiras é variável com o tempo. A sua grande desvantagem é a tendência para transmitir informação da fronteira para o interior do domínio.

Como primeiro passo, devem criar-se regiões onde as malhas poderão ter diferentes configurações, onde posteriormente serão atribuídas diferentes condições de fronteira. As regiões criadas neste estudo foram as seguintes:

- Inlet
- Outlet
- North
- South
- Base
- Top

- Pile
- Fence (para os casos das pilhas protegidas por quebra-ventos)

Para o caso deste estudo, os parâmetros para a geração da malha, já tinham sido otimizados num estudo anterior (Ferreira e Lambert, 2010), e são apresentados na Tabela 1:

Spacing	Face Spacing	Option	Geral	Pile	Fence
		Angular Resolution[Degrees]	30	18	18
		Minimum edge length[m]	0.0041	0.004	0.0041
		Maximum edge length[m]	0.02	0.0075	0.01
	Body Spacing	Maximum Spacing[m]	0.02	-	-
	Inflation	Number of inflated layers	5	-	-
		Expansion factor	1.2	-	1.2
		Minimum internal angle[Degrees]	2.5	-	-
		Maximum external angle[Degrees]	10.0	-	-
		Maximum Thickness[m]	-	0.05	-

Tabela 1 - Parâmetros para a geração da malha.

Ilustra-se na Figura 4, um exemplo de uma malha, na zona onde esta é mais refinada, neste caso na proximidade da superfície da pilha:

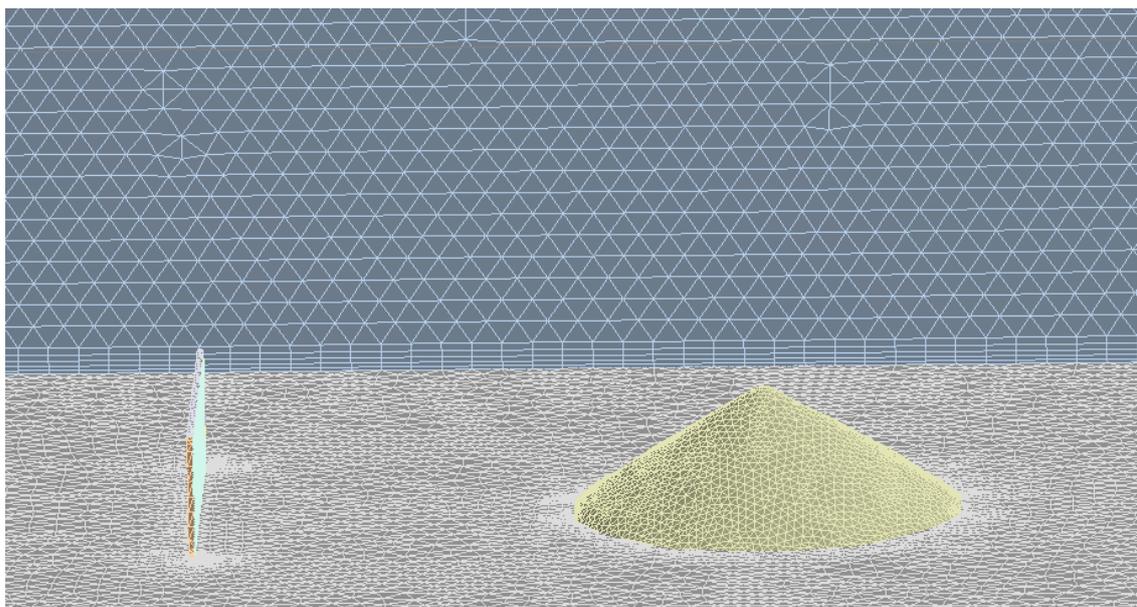


Figura 4 – Malha gerada, para o caso da simulação de uma pilha protegida por um quebra-vento sólido, situado à distância de  $3H$  ( $H=110\text{mm}$ ), no instante  $t=0$  minutos.

## 2.3. Pré – Processamento

Após a geração da malha, o passo seguinte no CFX-Pre, consiste na definição das condições de fronteira e as condições de domínio.

### 2.3.1. Domínio

O domínio é a região onde são resolvidas as equações do escoamento e onde devem ser definidas as propriedades do fluido, o tipo de fluido, o modelo de turbulência, o regime do escoamento, a transferência de calor, etc.

As características do domínio são apresentadas na seguinte tabela:

<b>Tipo de Fluido</b>	<b>Pressão de Referência</b>	<b>Impulsão</b>	<b>Movimento</b>	<b>Transferência de Calor</b>	<b>Modelo de Turbulência</b>
Ar a 25° C	1[atm]	Sem impulsão	Estacionário	Isotérmico a 25°C	k-ε

Tabela 2 - Características do domínio do fluido.

### 2.3.2. Modelo de turbulência

O modelo k-ε, utilizado no presente trabalho, é dos modelos de turbulência de utilização mais comum. Este modelo inclui duas equações extra para representar as propriedades turbulentas do escoamento, nomeadamente a produção e dissipação da energia cinética turbulenta. A variável k quantifica a energia cinética turbulenta, e a variável ε quantifica a dissipação turbulenta. O uso de gradientes de segunda ordem nas equações de escoamento intermédio e utilização da viscosidade turbulenta isotrópica promovem a estabilidade numérica e facilidade de cálculo.

### 2.3.3. Condições de fronteira

As condições de fronteira correspondentes às regiões criadas, na geração da malha, são aqui atribuídas, de modo a que em cada uma destas regiões se defina o fenómeno físico associado.

Em cada uma das próximas tabelas apresentam-se as características de cada uma das condições de fronteira atribuída às respectivas regiões.

- Inlet (Entrada)

Tipo de Fronteira	Regime de Escoamento	Perfil de Velocidade	Intensidade de turbulência
Entrada	Subsónico	Perfil (z)	Alta [10%]

**Tabela 3 - Características das condições de fronteira na entrada.**

O perfil de velocidade na entrada é dado pela seguinte equação:

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (1)$$

Em que  $u$  é a componente longitudinal da velocidade,  $U_0$  é a velocidade não perturbada, com o valor de 8.27 [m/s],  $z$  é a altura da pilha,  $\delta$  é a espessura da camada limite com o valor de 0.08 [m] e  $\alpha$  é expoente da lei da potência com o valor de 0.11, conforme os valores do perfil medido no túnel de vento do LAI (Sismeiro, 2010).

- Outlet (Saída)

Na fronteira assumiu-se o escoamento como perfeitamente desenvolvido, pelo que o gradiente, na perpendicular à superfície de saída, é considerado nulo.

Tipo de Fronteira	Regime do Escoamento	Pressão Relativa
Saída	Subsónico	0[Pa]

**Tabela 4 - Características das condições de fronteira na saída.**

- North (Norte), South (Sul), Top (Topo)

Tipo de Fronteira	Regime do Escoamento	Pressão Relativa	Direcção do Escoamento	Intensidade de Turbulência
Abertura	Subsónico	0[Pa]	Normal à condição de fronteira	Alta [10%]

**Tabela 5 - Características das condições de fronteira da zona Norte, Sul e Topo.**

- Base (Base), Pile (Pilha), SolidFence (Barreira Sólida)

Tipo de Fronteira	Tipo de Escoamento sobre a Fronteira	Rugosidade ( $Z_0$ )
Parede	Sem escorregamento	$d/30 = 1.667e-05$ <sup>1</sup>

**Tabela 6 - Características das condições de fronteira da base, da pilha e da barreira sólida.**

- Porous Fence (Barreira Porosa)

No caso das simulações de pilhas protegidas por barreiras com 70 % de porosidade, é necessário criar uma interface pois existem domínios diferentes em contacto, o caso do domínio do ar e o domínio poroso da barreira. Apresentam-se nas Tabelas 7 e 8, as características do domínio da barreira porosa:

Tipo de Fluido	Tipo de Domínio	Pressão de Referência	Movimento	Transferência de Calor	Modelo de Turbulência	Impulsão
Ar a 25°C	Poroso	1[atm]	Estacionário	Isotérmico a 25°C	k-ε	Sem Impulsão

**Tabela 7 - Características das condições de fronteira da barreira porosa.**

Porosidade	Perdas Isotrópicas	Coefficiente de Resistência linear	Coefficiente de Resistência Quadrática
0.7	Coefficiente de resistência Linear e quadrática	0 [kg/m <sup>3</sup> .s]	39.03 [kg/m <sup>4</sup> ]

**Tabela 8 - Continuação das características das condições da barreira porosa.**

O coeficiente de resistência quadrática, de cada uma das barreiras foi medido por Sanchez (2009).

<sup>1</sup>  $d$  – Representa o diâmetro médio da partícula, e toma o valor 0.5mm.

## 2.4. Resolução das equações

Após atribuídas as características dos domínios e especificadas as condições de fronteira, o próximo passo será a resolução de equações, através do CFX-Solver. Aqui são resolvidas todas as equações, no presente caso equação de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento, e as equações relativas ao modelo de turbulência.

Para este passo é necessário definir alguns critérios, apresentados na Tabela 9:

Resolução	Número máximo de iterações	Tipo de Resíduo	Alvo de Resíduo
Alta	500	RMS	$1 \times 10^{-5}$

Tabela 9 - Critérios de convergência para a resolução das equações no CFX-Solver.

A simulação termina, após ter sido atingido um valor do resíduo inferior ao especificado, ainda que não tenha sido efectuado número máximo de iterações, ou caso este valor não seja atingido a simulação terminará no número máximo de iterações.

Na Figura 5 mostram-se os gráficos de convergência da conservação da massa e quantidade de movimento e ainda a convergência respectiva ao modelo de turbulência:

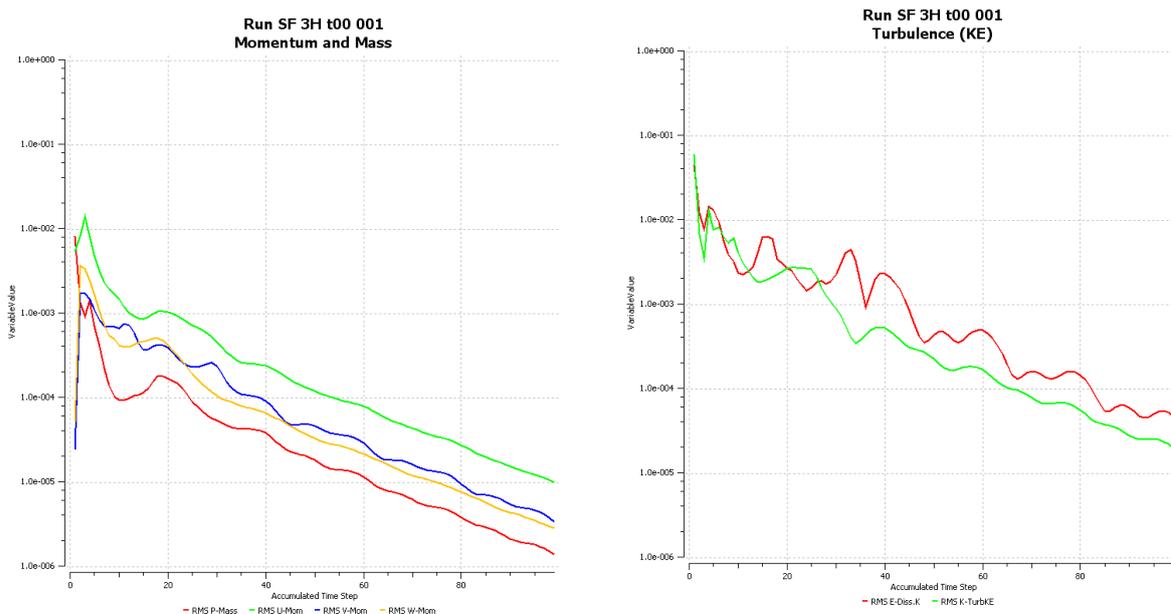


Figura 5 - Gráficos da convergência de resíduos, relativos à conservação da massa e quantidade de movimento (à esquerda), e às propriedades do modelo de turbulência (k-ε) (à direita).

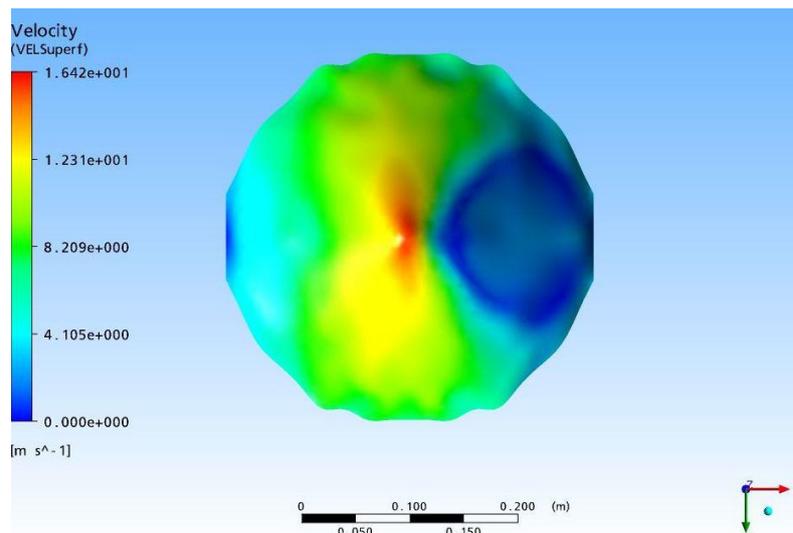
## 2.5. Pós-Processamento

Após a resolução das equações, segue-se a análise dos resultados obtidos, no *CFX-Post*.

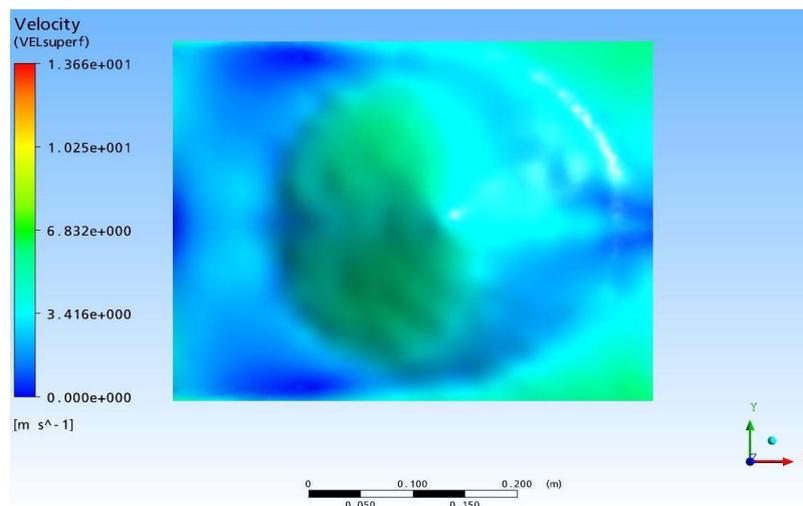
De acordo com os objectivos do trabalho, os resultados que interessa analisar, são os valores relativos à velocidade na proximidade da superfície das pilhas.

É então, criada uma superfície paralela à superfície da pilha, à distância de 2.5 mm, valor baseado no estudo de Stunder e Ayra (1988). Este valor corresponde a uma distância de 0.25 m numa escala real, na qual é considerada a velocidade do vento para a estimativa do potencial de poeiras emitidas, de acordo com o relatório EPA (2006).

São assim ilustrados, nas Figuras 6 e 7, dois exemplos para uma melhor compreensão das diferenças entre os casos da pilha desprotegida e abrigada por barreira sólida, respectivamente:



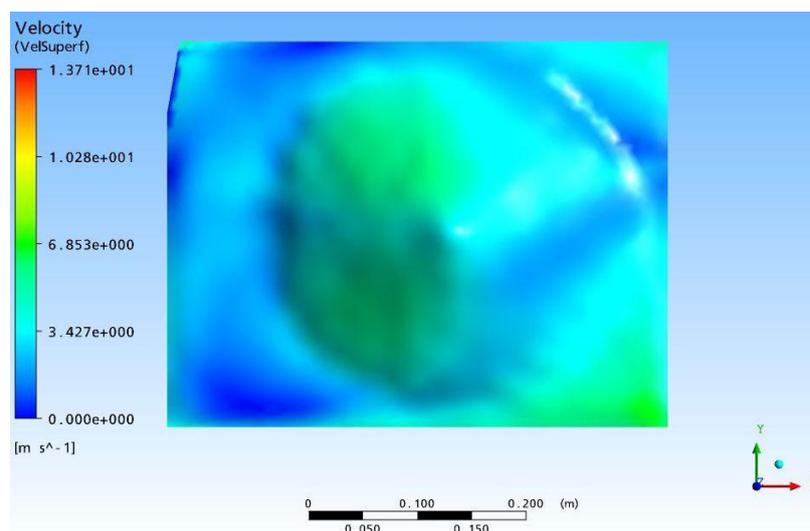
**Figura 6 - Velocidade a 2.5mm da superfície da pilha desprotegida, no instante t=0 minutos.**



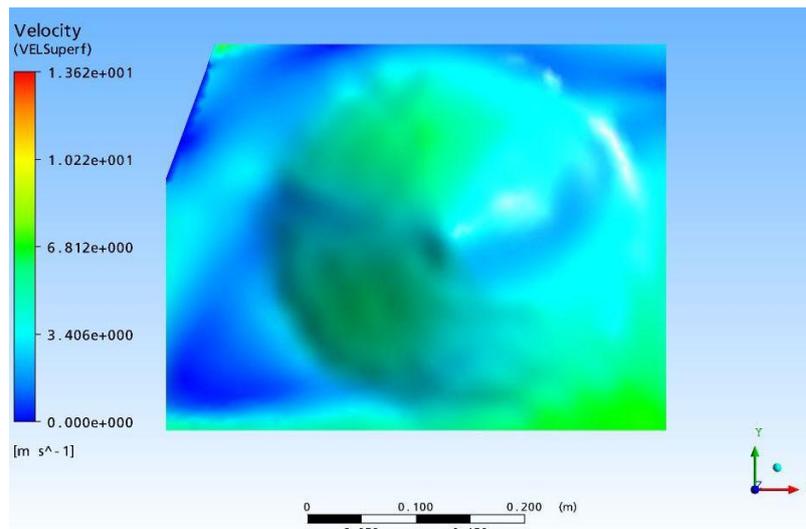
**Figura 7 - Velocidade a 2.5mm da superfície da pilha protegida por uma barreira sólida situada à distância H (H=110mm).**

Pela confrontação das Figuras 6 e 7, é claramente visível o efeito da colocação da barreira, onde se pode constatar que a velocidade na proximidade da superfície da pilha é significativamente menor.

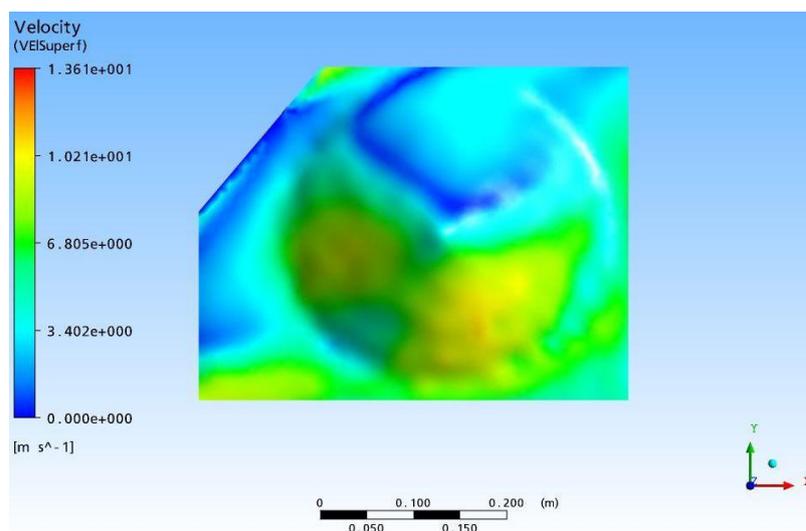
Avalia-se agora, nas Figuras 8 a 10, o efeito de quebra-ventos, colocados à mesma distancia H, mas fazendo variar a orientação das barreiras em relação ao escoamento incidente:



**Figura 8 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância H com orientação de 10° com a direcção do escoamento incidente.**



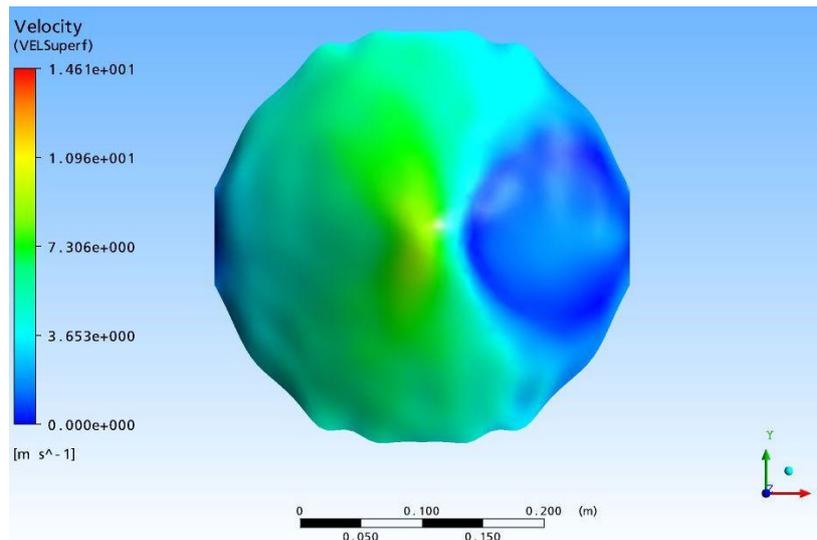
**Figura 9 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância H com orientação de 20° com a direcção do escoamento incidente.**



**Figura 10 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância H com orientação de 40° com a direcção do escoamento incidente.**

Nas Figuras 8 a 10, é ilustrada a velocidade na proximidade da superfície das pilhas, e também visível a influência na redução da mesma, com o uso de barreiras. No entanto estas protecções sólidas induzem zonas de recirculação no seu rasto, provocando assim o arrastamento de bastante material para a zona a montante da pilha.

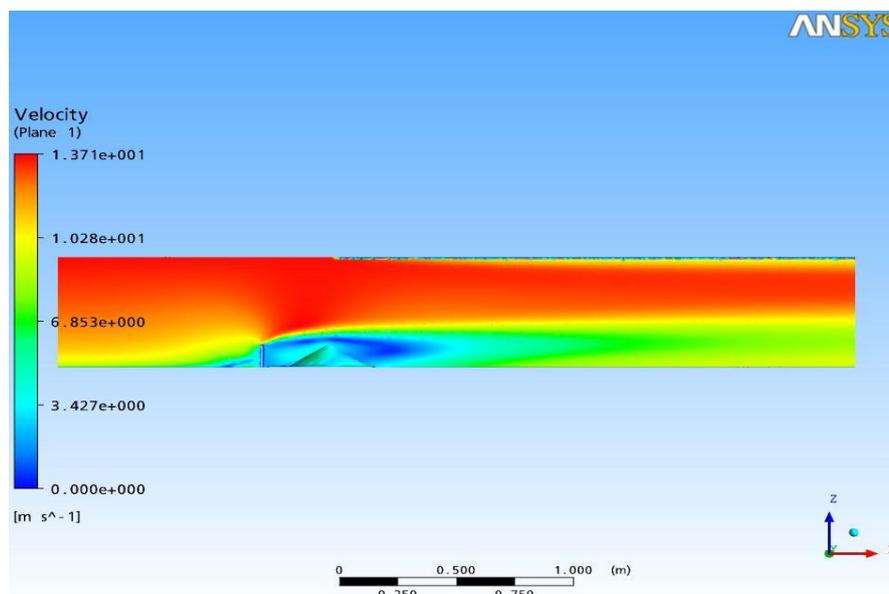
Por este motivo, e para evidenciar as diferenças neste aspecto, ilustra-se agora, na Figura 11, um exemplo de uma pilha abrigada por barreira com 70% de porosidade situada à distância H:



**Figura 11 – Velocidade do escoamento na proximidade da pilha protegida por barreira com 70% de porosidade, situada a uma distância  $H$ , com orientação de  $20^\circ$  com a direcção do escoamento incidente.**

Pode verificar-se a eficiência da utilização de barreiras, como nos casos anteriores, mas neste caso com a vantagem de que não existirão problemas com a recirculação, pois segundo Perera (1981) a recirculação desaparece para valores de porosidade superiores a 30%.

Apresenta-se também, na Figura 12, uma imagem da distribuição da velocidade do escoamento, no plano de simetria vertical, no rasto da barreira:



**Figura 12 - Representação da velocidade num plano de simetria vertical, na simulação de uma pilha protegida por uma barreira sólida, situada à distância  $H$ , com inclinação de  $10^\circ$  com a direcção do escoamento incidente.**

Com a Figura 12, consegue-se uma boa percepção da trajetória das partículas, e o que esta diminui, na presença de barreiras protectoras. Também é possível perceber a presença de uma zona de recirculação na zona a montante da pilha e assim entender a quantidade de material que é arrastado para junto da barreira ao fim de vários minutos de erosão, como foi constatado em testes feitos no túnel de vento.

No capítulo seguinte identificam-se as zonas onde a velocidade mais influencia a deformação da superfície das pilhas. Para tal foram exportados os valores da velocidade, na superfície distante 2.5 mm da pilha, obtidos no CFX, para tratamento pelo software *Tecplot*.

### 3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo é avaliada a velocidade na proximidade da superfície da pilha, como foi anteriormente referido. Recorre-se então ao software *Tecplot*, onde se pode representar a deformação da pilha, assim como os valores da velocidade, que haviam sido exportados das superfícies, anteriormente criadas no *CFX-Post*.

#### 3.1. Evolução temporal da deformação da pilha exposta a 20 minutos de erosão

Nas Figuras 13 e 14, apresentam-se os contornos dos vários “níveis” da velocidade do escoamento e representam-se de forma tridimensional de modo a ser visível a alteração da superfície ao longo dos vinte minutos de erosão.

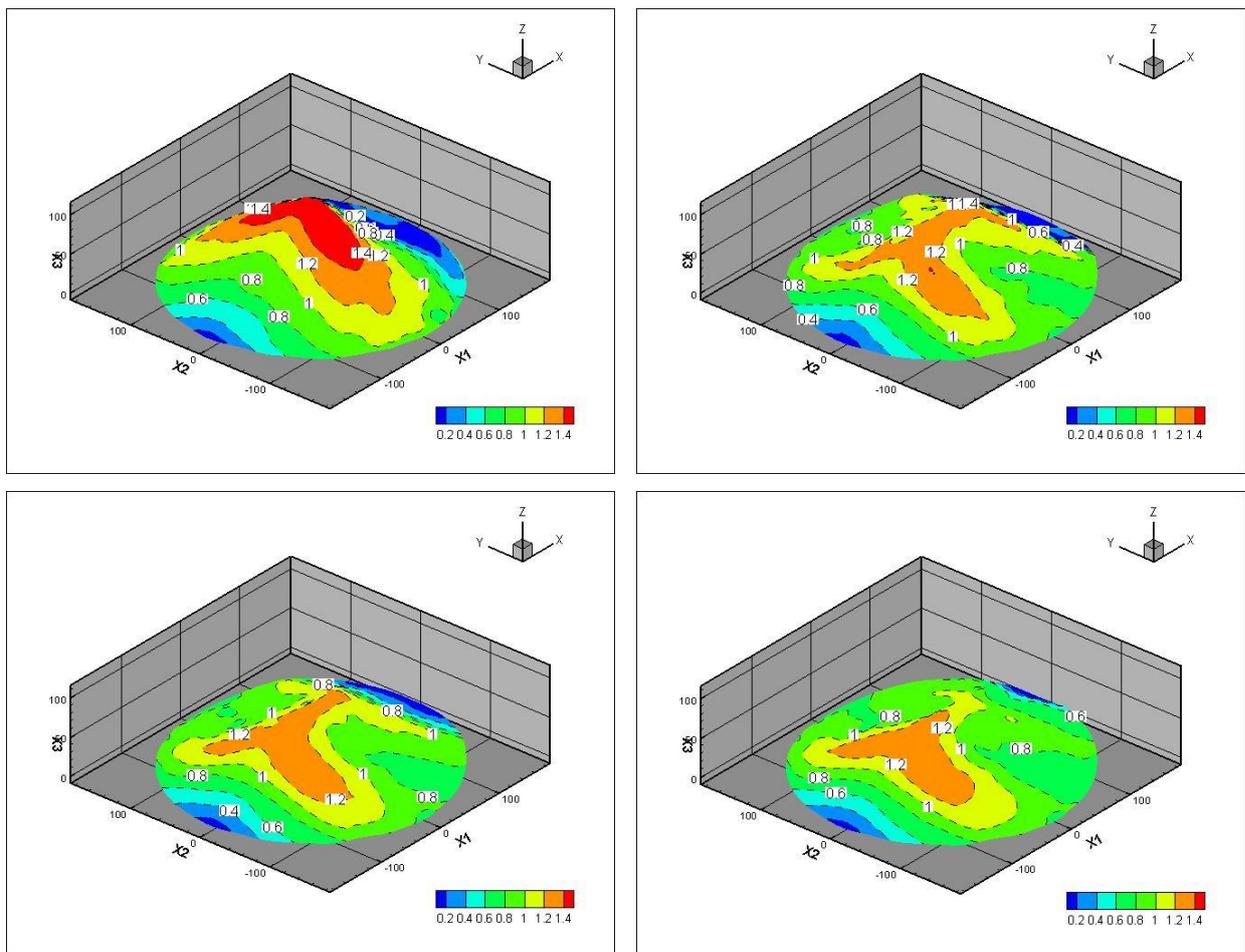


Figura 13 – Velocidade do escoamento ( $u_x/u_x$ ) nos instantes  $t=0, 2, 3, 4$  minutos, respectivamente.

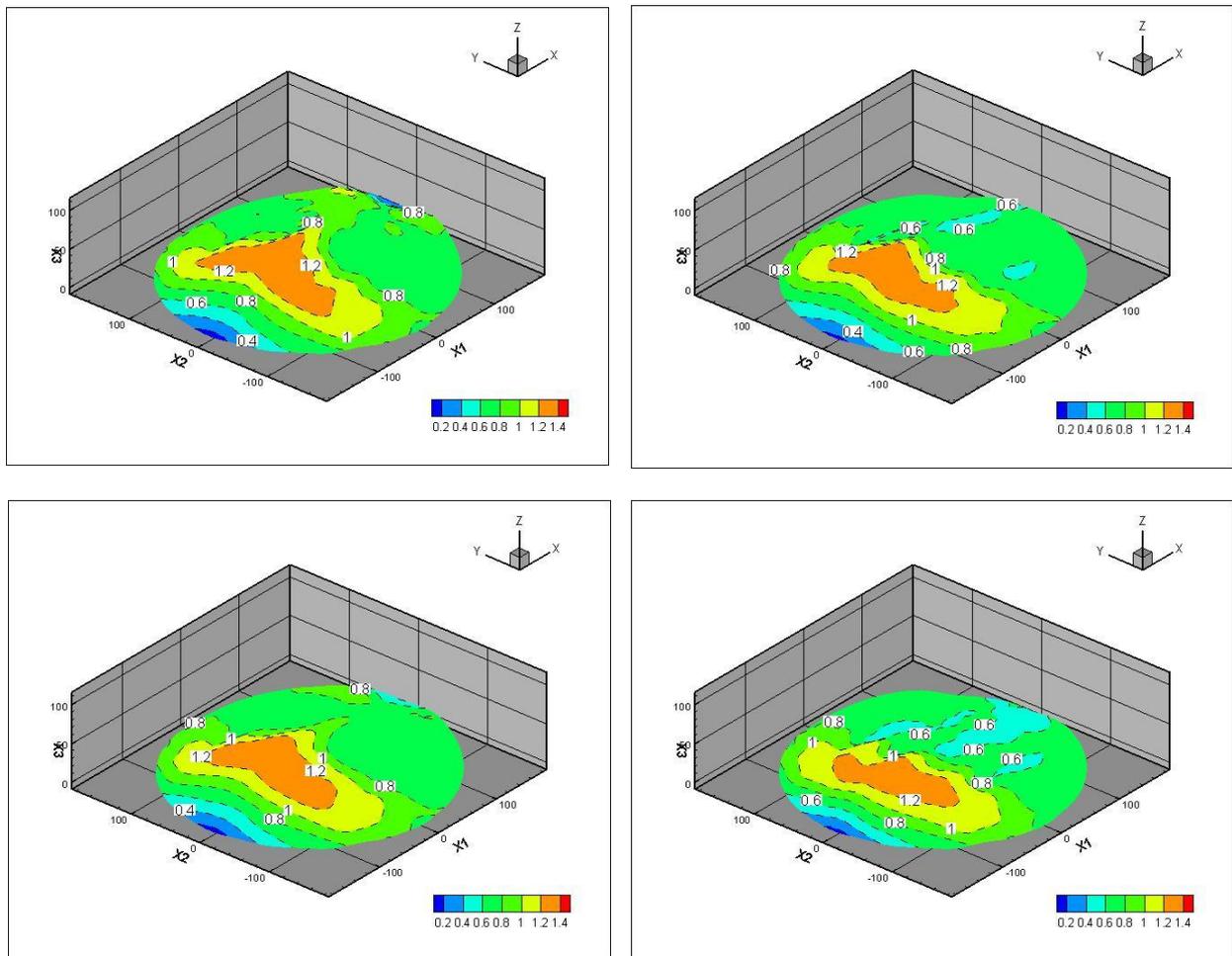


Figura 14 - Velocidade do escoamento ( $u_s/u_r$ ), no instante  $t = 5, 10, 15$  e  $20$  minutos, respectivamente

Embora não se ilustrem todos os resultados aqui, foram simulados todos os tempos intermédios, de 0 até 20 minutos, e foi feito um pequeno vídeo, com vinte imagens (frames) correspondentes aos vinte minutos de simulação.

### 3.2. Pilha protegida por barreiras sólidas

Apresenta-se na Figura 15, um pequeno esquema representativo das diferentes distâncias das barreiras à pilha (DF), no presente trabalho.

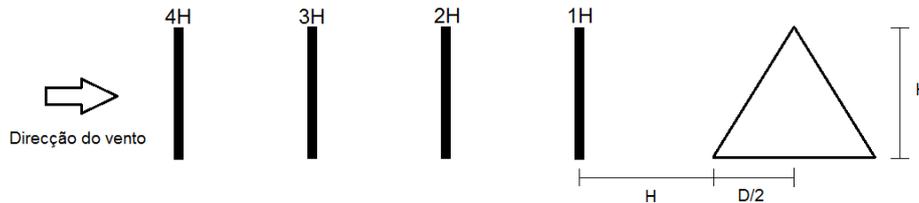


Figura 15 - Esquema representativo das diferentes posições da barreira sólida com orientação,  $\gamma=0^\circ$ , com a direcção do escoamento.

Na Figura 16, mostram-se as linhas da velocidade na proximidade da pilha, protegida por barreira sólida (SF), colocada a diferentes distâncias da base da pilha. Entenda-se que ao falar de uma barreira sólida, se trata de uma barreira com  $\phi=0\%$ , sendo  $\phi$  a percentagem da porosidade da barreira. A direcção do vento é no sentido da esquerda para a direita, tal como se encontra representado na Figura 15.

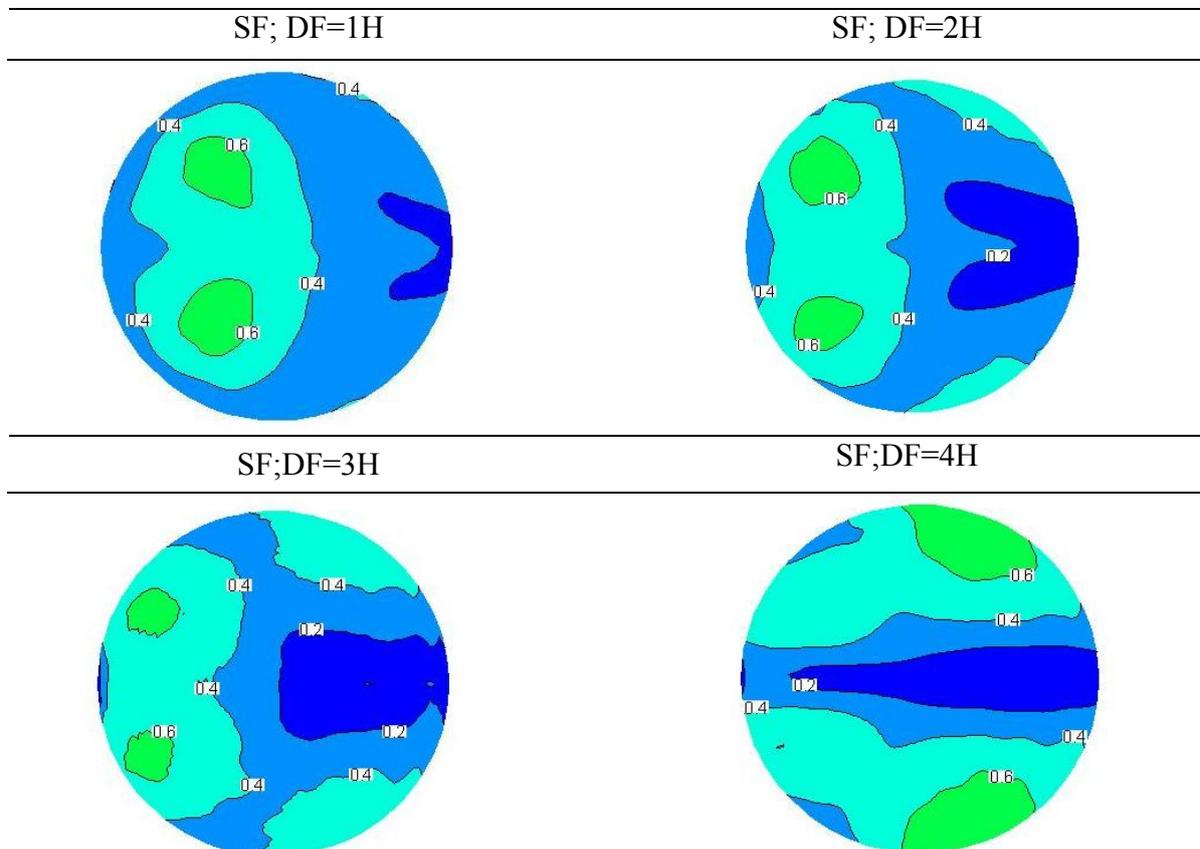


Figura 16 - Velocidade ( $u_s/u_s$ ), na proximidade da superfície da pilha, no instante  $t=0$  minutos, para os casos da barreira situada a uma distância H, 2H, 3H e 4H, respectivamente.

Ao avaliar os casos das pilhas protegidas por quebra-ventos sólidos, com porosidade,  $\phi=0$ , podem constatar-se diferenças bastante significativas, quando se altera a distância do quebra-vento à pilha. Tal como é verificado na análise experimental, e como é referido anteriormente, ocorre recirculação no rasto da barreira, no caso das pilhas protegidas por quebra-ventos não-porosos.

Tal fenómeno arrasta muito do material granular, para a zona a montante da pilha e sobretudo para junto da barreira. No entanto, constata-se também que estas zonas, correspondem às zonas de valores mais altos da velocidade, no caso em que a barreira se situa na proximidade da pilha. Estes valores da velocidade, principais responsáveis pela erosão, são menos significativos à medida que se aumenta a distância do quebra-vento à pilha, tal como também é constatado, ao analisar a deformação vertical da pilha. É portanto para as distâncias de  $3H$  e  $4H$ , que o fenómeno da recirculação se torna menos determinante na erosão das pilhas.

Analisa-se agora a influência de diferentes ângulos de orientação ( $\gamma$ ), na erosão da pilha. Na Figura 17 ilustra-se um simples esquema da colocação da barreira, para um melhor entendimento da orientação ( $\gamma$ ).

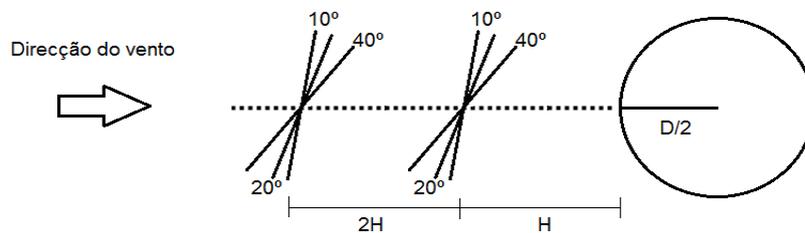


Figura 17 - Esquema representativo dos diferentes ângulos considerados para o escoamento em pilhas protegidas por barreiras sólidas adaptada de Sismeiro (2010).

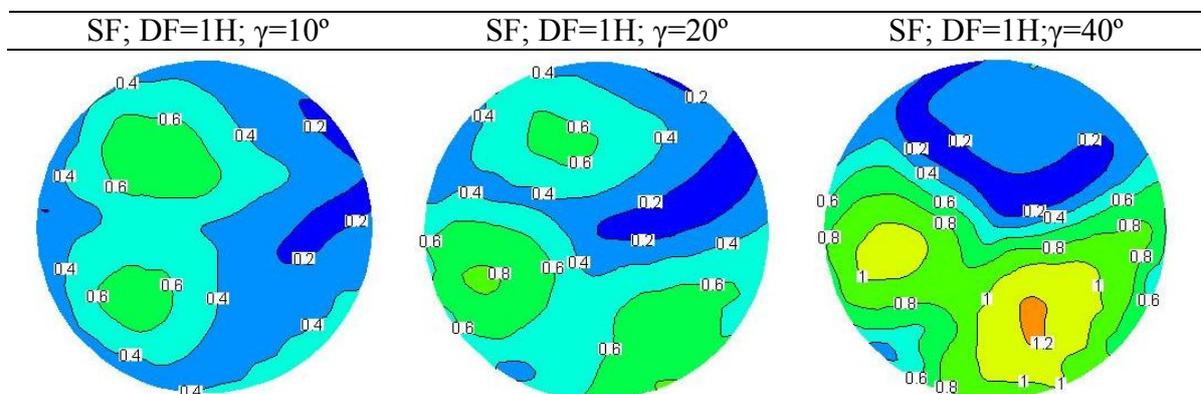
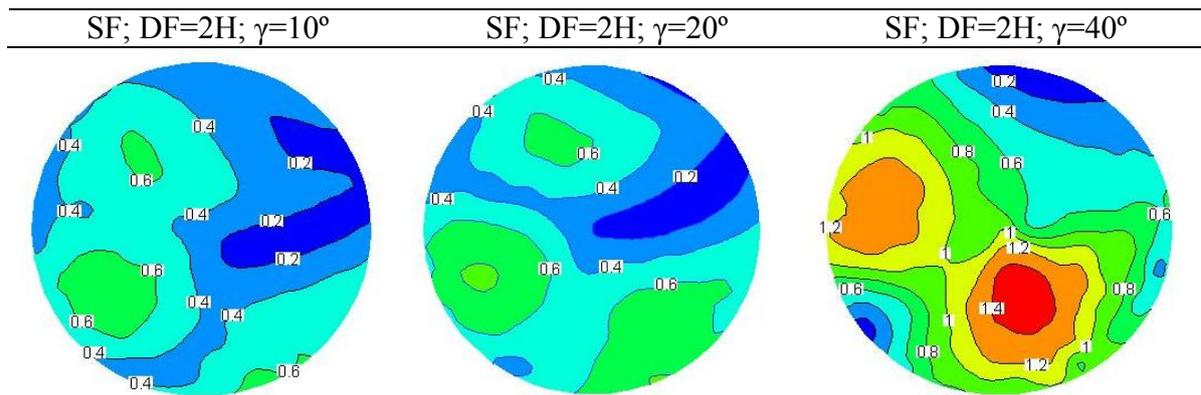


Figura 18 - Velocidade ( $u_s/u_r$ ) na proximidade da superfície da pilha, para os casos da barreira sólida situada a uma distância  $H$ , e com as orientações de  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $40^\circ$ .



**Figura 19 - Velocidade do escoamento ( $u_s/u_s$ ) na proximidade da superfície da pilha protegida com barreira sólida situada a uma distância 2H, com orientações de 10, 20 e 40°, respectivamente.**

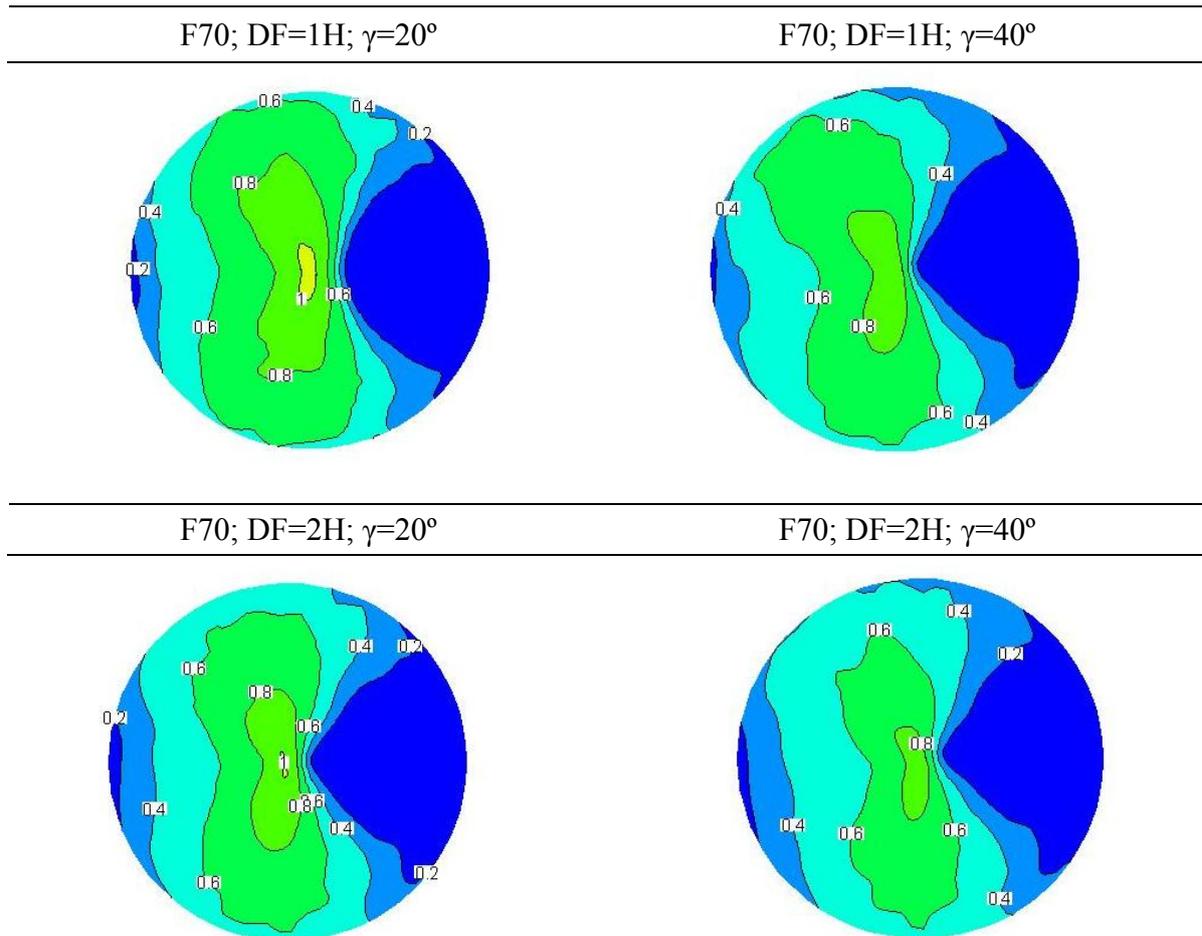
Os casos das barreiras posicionadas obliquamente têm como objectivo simular a incidência de ventos laterais. Este é um estudo ao qual não se tem dado grande relevância, pois na grande maioria dos casos, apenas é considerada a posição de maior eficiência da barreira, isto é, perpendicularmente ao escoamento. Esta situação é abordada por Stunder e Arya (1988), a qual é também aqui considerada.

Pode então observar-se, através das Figuras 18 e 19 que, à medida que se aumenta o ângulo que a barreira faz com o escoamento não perturbado, os valores da velocidade são significativamente mais altos nas zonas mais desprotegidas da pilha, o que por sua vez provoca uma maior erosão da pilha nessas mesmas zonas.

É ainda claro, nas Figuras 18 e 19 que, também a distância (DF) tem influência nestas situações, e que para o caso da barreira situada a uma distância (DF=2H), com orientação,  $\gamma=40^\circ$ , a velocidade na proximidade da pilha toma os valores mais elevados, sendo essa a situação mais crítica de entre as analisadas.

### 3.3. Pilha protegida por barreiras porosas

Analisam-se, na Figura 20, as linhas da velocidade para os casos da pilha protegida por barreira com  $\phi=70\%$ , posicionada obliquamente, uma vez que já foram analisados os casos com barreira posicionada perpendicularmente, por Ferreira e Lambert (2010).



**Figura 20 – Velocidade do escoamento ( $u_s/u$ ) a 2.5mm da superfície da pilha, protegida por barreira porosa situadas às distâncias H e 2H, com orientação de 20 e 40°, respectivamente.**

Para os casos das barreiras com porosidade, foram simulados apenas casos de barreiras com 70% de porosidade. Também aqui, foram consideradas as situações de ventos laterais. Numa primeira abordagem e comparativamente com a situação da pilha desprotegida, é sem dúvida visível, na Figura 20, a redução da velocidade nas proximidades da superfície da pilha, com a colocação da protecção.

É ainda visível, na Figura 20, que a zona mais afectada pelos maiores valores de velocidade é o pico da pilha, e que não existe recirculação, como acontecia nos casos anteriores, com barreira sólida, situação já esperada pois, tal como foi anteriormente referido, a recirculação é um fenómeno que deixa de ocorrer quando as barreiras têm uma porosidade superior a 30%.

No que diz respeito à orientação das barreiras, pode verificar-se que, ao contrário do que acontecia nos casos das barreiras sólidas, os casos de situações com  $\gamma=20^\circ$ , apresentam valores mais altos da velocidade quando comparados com os casos das situações com  $\gamma=40^\circ$ . Esta orientação das barreiras também não é tão evidenciada como nos casos das barreiras sólidas, em que se observava que existia uma zona mais abrigada que outra. Se forem comparados os casos das pilhas protegidas com barreira sólida, (Figura 19), situada a uma distância  $DF=2H$ , com  $\gamma=40^\circ$  com os casos das pilhas protegidas por barreira porosa situada também a uma distância  $DF=2H$  e  $\gamma=40^\circ$  (Figura 20), podem constatar-se diferenças muito significativas.



## 4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NO FLUXO DO MATERIAL GRANULAR

A velocidade, como já foi referido anteriormente, é um factor determinante na deformação da superfície das pilhas, isto é, no fluxo de material erodido. Como tal, neste capítulo é analisada a influência desta, usando duas aplicações específicas feitas em Visual Basic. Numa das aplicações calcula-se o fluxo de material, erodido e/ou depositado, e na outra aplicação é determinada a velocidade média, a partir da informação proveniente do CFX, nas mesmas áreas onde se mediu a erosão/deposição.

A primeira aplicação, respeitante ao cálculo do fluxo do material, avalia a deformação vertical, e o conseqüente fluxo, entre dois tempos de erosão, por exemplo entre 0 e 2 minutos. Em cada uma das áreas, numa malha bi-dimensional (i,j), segundo x e y, respectivamente, considera-se que o fluxo assume valores positivos quando se trata de deposição de material e partículas, e negativo nas regiões onde existe erosão, ou seja onde a altura da pilha diminui com o tempo.

Para uma melhor visualização do que foi dito, mostra-se, na Fig. 21, a evolução do fluxo ao longo do eixo das abcissas:

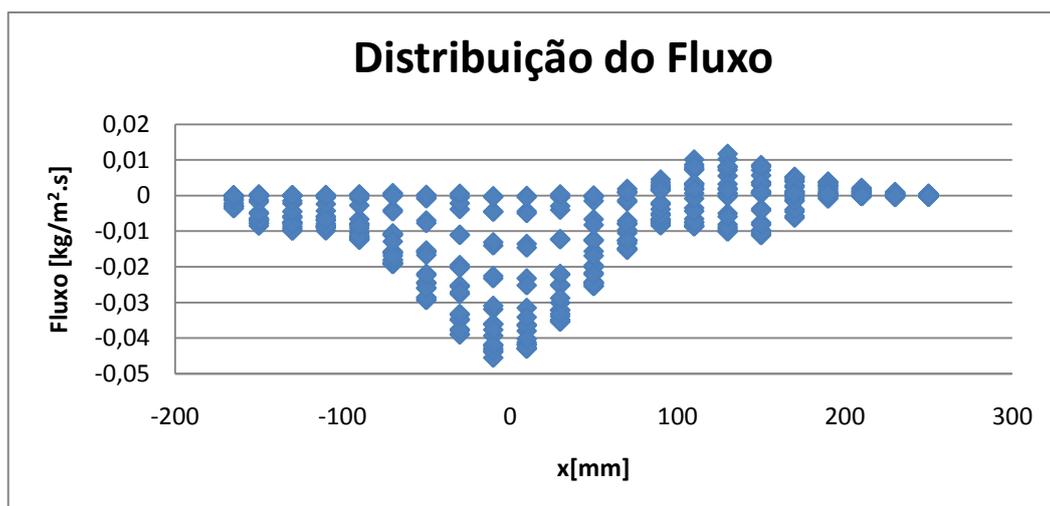


Figura 21 - Distribuição do fluxo de material ao longo do eixo x.

Podem identificar-se, ao longo do eixo, quais as zonas sujeitas a erosão e quais a zona onde ocorre a deposição. Como seria de esperar, na parte de montante da pilha ocorre sobretudo a erosão, enquanto a deposição acontece na parte de jusante, isto para o caso de uma pilha desprotegida. É também visível que a zona mais crítica, onde ocorre mais erosão, é a zona central da pilha, também como era de esperar, pois a velocidade toma valores superiores segundo a direcção normal.

Usando a outra aplicação, foram calculados os valores médios da velocidade, para a mesma malha empregue no cálculo do fluxo, para assim se relacionar o fluxo erodido/depositado com a velocidade na proximidade da superfície das pilhas prevista numericamente.

Os valores da velocidade, obtidos através da simulação computacional, e a 2.5 mm da superfície da pilha, adimensionalizados ( $u_s/u_r$ ), são lidos a partir de um ficheiro “.txt”, o que fornece o valor da velocidade em cada elemento ( $Vel\_cfx(n)$ ), e a área ( $Area\_cfx(n)$ ). O passo seguinte do algoritmo consiste em encontrar qual a célula (i,j) correspondente, usando as coordenadas do ponto, visando o cálculo da velocidade média nessa célula. Assim, para cada ponto ou célula (i,j), a velocidade média ( $vel\_Media(i,j)$ ) é determinada a partir das seguintes expressões:

$$Soma\_VA_{(i,j)} = \sum (Vel\_cfx_{(n)} * Area\_cfx_{(n)}) \quad (2)$$

$$AreaCelula_{(i,j)} = \sum Area\_cfx_{(n)} \quad (3)$$

$$Vel\_Media_{(i,j)} = \frac{Soma\_VA_{(i,j)}}{AreaCelula_{(i,j)}} \quad (4)$$

Em que:

- $Soma\_VA_{(i,j)}$  é a soma da multiplicação da velocidade pela área, retiradas das simulações, em cada célula (i,j) da malha considerada no cálculo do fluxo;
- $Vel\_cfx_{(n)}$  são os valores da velocidade já adimensionalizada, ( $u_s/u_r$ ), lidos de um ficheiro “.txt”
- $Area\_cfx_{(n)}$  são os valores das áreas do elemento de cálculo proveniente do CFX

- $AreaCelula_{(i,j)}$  é a soma das áreas cujas coordenadas se enquadram na célula(i,j) da malha
- $VelMedia_{(i,j)}$  representa a velocidade média em cada célula(i,j) da malha

Relacionam-se, na Figura 22, os valores obtidos da velocidade média, com os resultados obtidos do fluxo do material, para o caso da pilha desprotegida, durante os dois primeiros minutos de erosão. É apresentado, de seguida, um gráfico no qual se pode ver a correlação entre a velocidade prevista com a correspondente taxa de erosão.

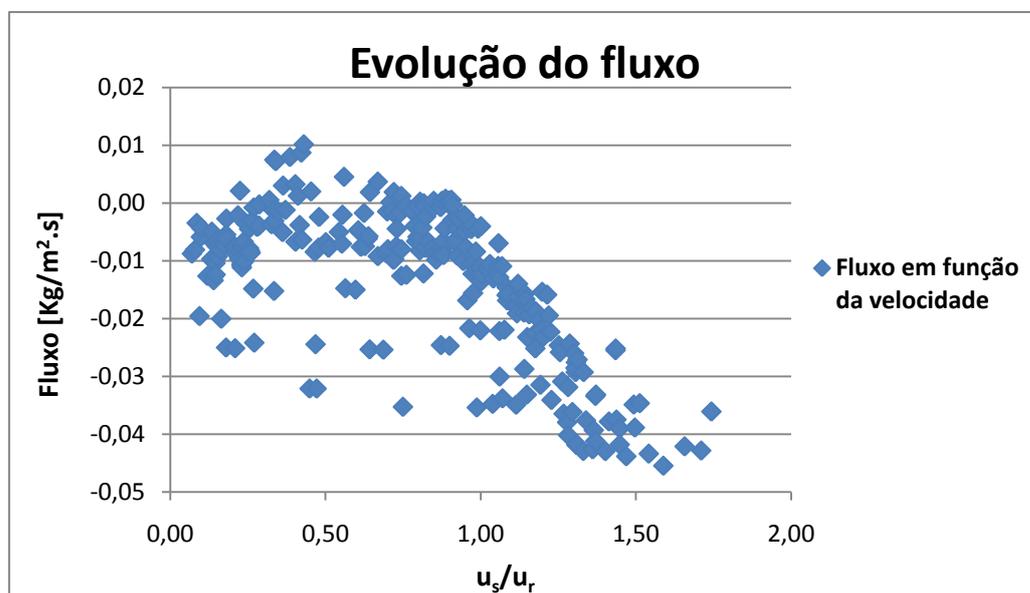


Figura 22 - Evolução do fluxo em função da velocidade média na proximidade da pilha desprotegida.

Pela análise da Figura 22, constata-se que existe uma correlação entre o fluxo e a velocidade prevista, em que o fluxo erodido aumenta com a velocidade. Pode constatar-se também que, para velocidades mais altas, o fluxo erodido aumenta bastante.

Na Figura 23 pode ver-se, de forma mais detalhada, a análise das zonas correspondentes à erosão, em que se mostra a recta de correlação.

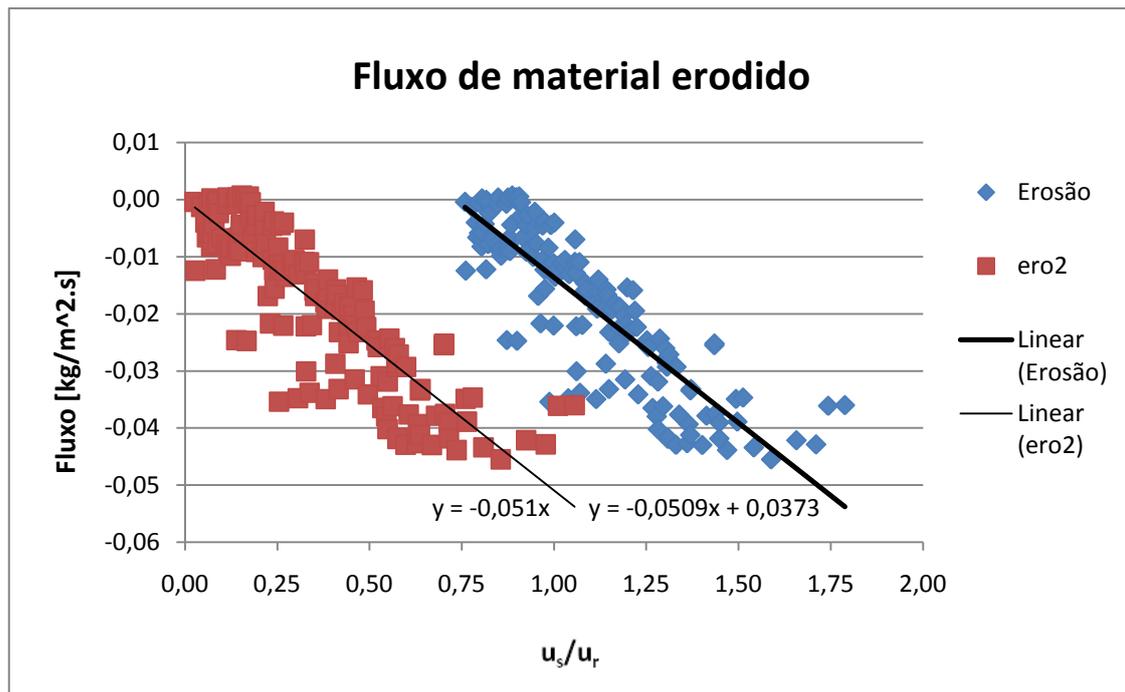


Figura 23 - Evolução do fluxo de material erodido em função da velocidade média à superfície, para o caso da pilha desprotegida.

De acordo com o procedimento EPA (2006), o potencial de erosão é dado pela seguinte equação:

$$P = 58 \times (u_* - u_{*t})^2 + 25 \times (u_* - u_{*t}) \quad (5)$$

sendo que:

- $P$ , o potencial de erosão
- $u_*$ , a velocidade de atrito
- $u_{*t}$ , a velocidade mínima de atrito, que para o caso da areia em questão é aproximadamente igual a 0.33 m/s

Ao avaliar as rectas com a tendência do fluxo em função da velocidade, é notória a influência da velocidade no potencial de erosão conforme foi anteriormente referido, através da Equação 5. No entanto, torna-se evidente a proporcionalidade entre a velocidade e o fluxo ou o potencial de erosão.

Analisa-se de seguida (Figuras 24 a 29) as situações da pilha protegida com barreira sólida, colocada a uma distância  $DF=2H$  e perpendicular ao escoamento, e com orientação,  $\gamma=20^\circ$ , e ainda o caso da pilha protegida por barreira porosa situada a uma distância  $DF=2H$  com  $\gamma=20^\circ$ .

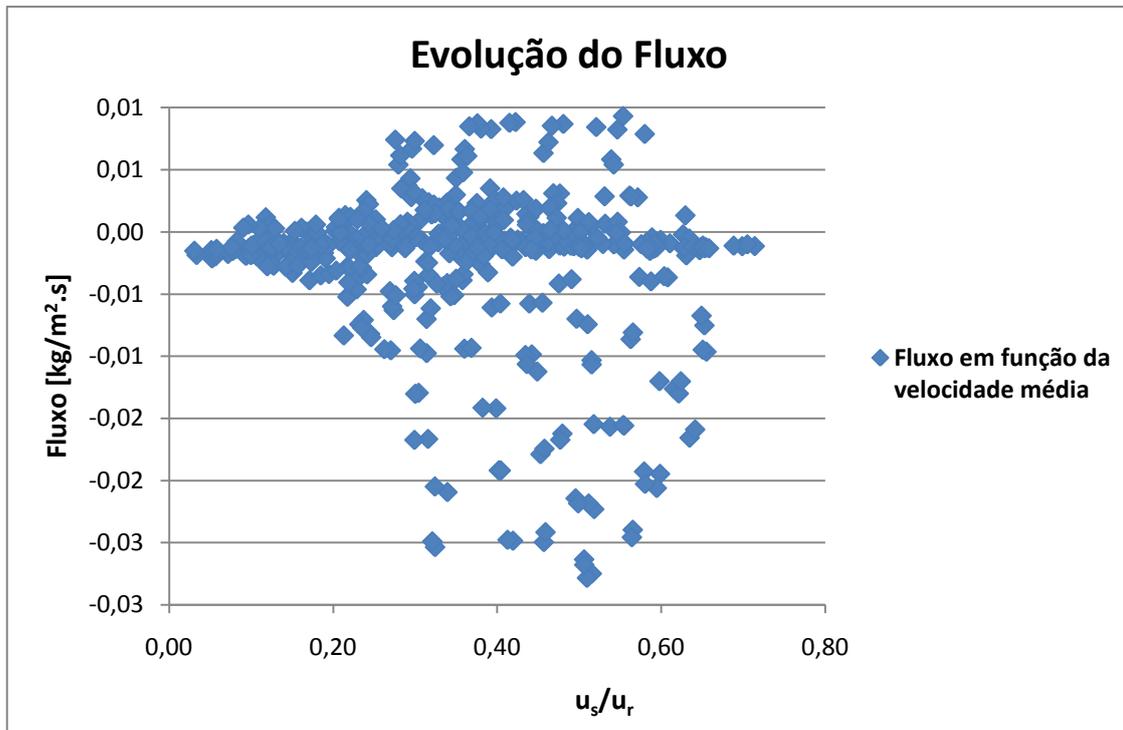


Figura 24 - Gráfico da evolução do fluxo em função da velocidade média, para o caso da pilha protegida por uma barreira sólida, colocada a uma distância de  $2H$ .

No caso da pilha protegida por uma barreira sólida, Figura 24, embora seja clara a influência da velocidade, na quantidade de material erodido, não é evidente uma tendência do fluxo de material, até porque para estes casos existe o fenómeno da recirculação, que é necessário ter em conta.

Avalia-se também o fluxo, mas segundo o eixo longitudinal, onde neste caso pode observar-se o fenómeno da recirculação, e onde se verifica deposição de material na parte jusante da pilha

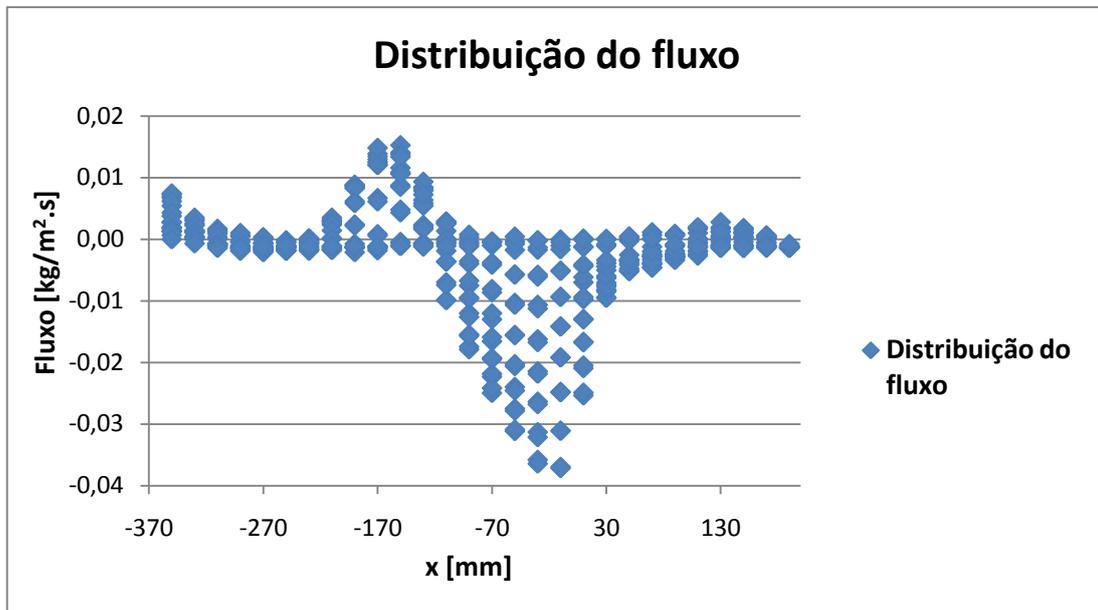


Figura 25 - Evolução do fluxo ao longo do eixo das abcissas, para o caso da pilha protegida por barreira sólida, situada uma distância de  $2H$ .

Pode constatar-se no gráfico da Figura 25, que existe uma percentagem de fluxo positivo (deposição) significativa, na face de montante da pilha, consequência da recirculação, ainda que a análise esteja a ser feita apenas para o caso da pilha erodida nos primeiros dois minutos.

O caso que se apresenta de seguida, na Figura 26, é para a pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância  $DF=2H$ , mas com orientação,  $\gamma=20^\circ$ .

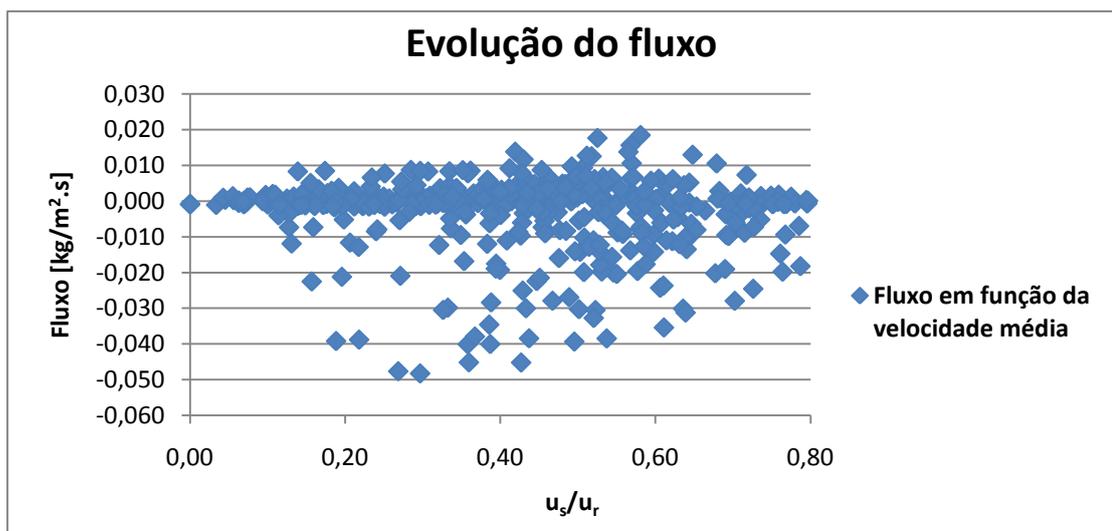


Figura 26 – Correlação entre o fluxo de material e a velocidade prevista na proximidade da superfície de uma pilha protegida por barreira sólida colocada a uma distância de  $2H$  com orientação de  $20^\circ$ , nos dois primeiros minutos de erosão.

Analisando a Figura 26, é menos notória a correlação entre o fluxo de material erodido e a velocidade prevista. No entanto, de acordo com os resultados obtidos, através das imagens do *Tecplot*, onde se podem consultar os padrões da velocidade, espera-se que o fluxo de material erodido seja maior de um dos lados da pilha. Apresenta-se por essa razão a distribuição do fluxo ao longo dos valores de Y, na Figura 27.

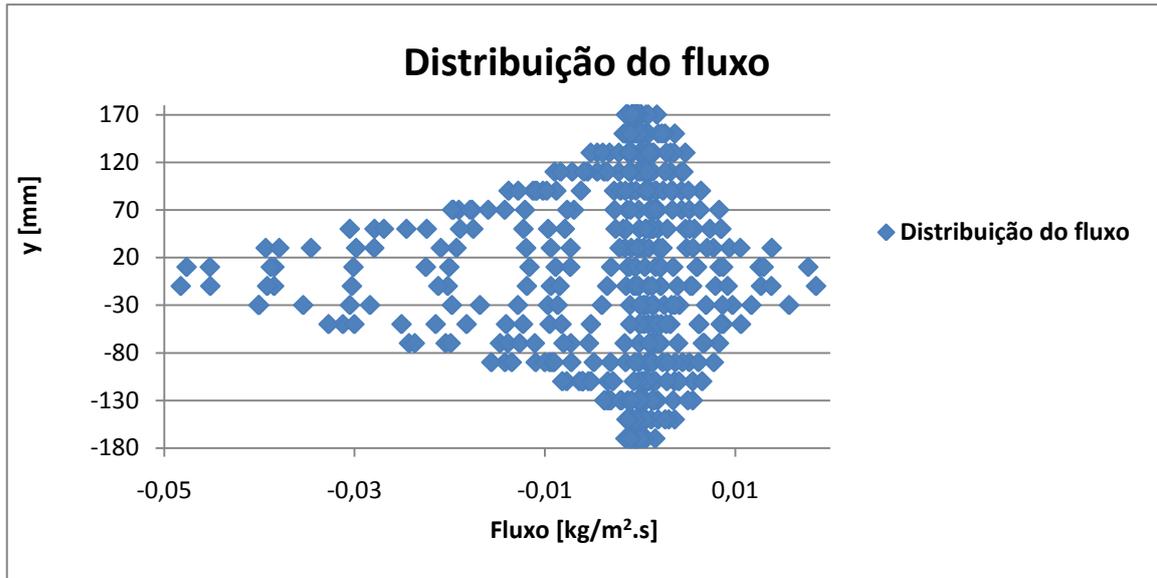


Figura 27 - Apresentação do fluxo segundo valores de y para o caso da pilha protegida por barreira sólida situada a uma distância de 2H, com orientação de 20°.

Apresenta-se por fim, na Figura 28, o caso da pilha protegida por uma barreira com 70% porosidade, situada à distância de 2H, com  $\gamma=20^\circ$ , erodida durante dois minutos.

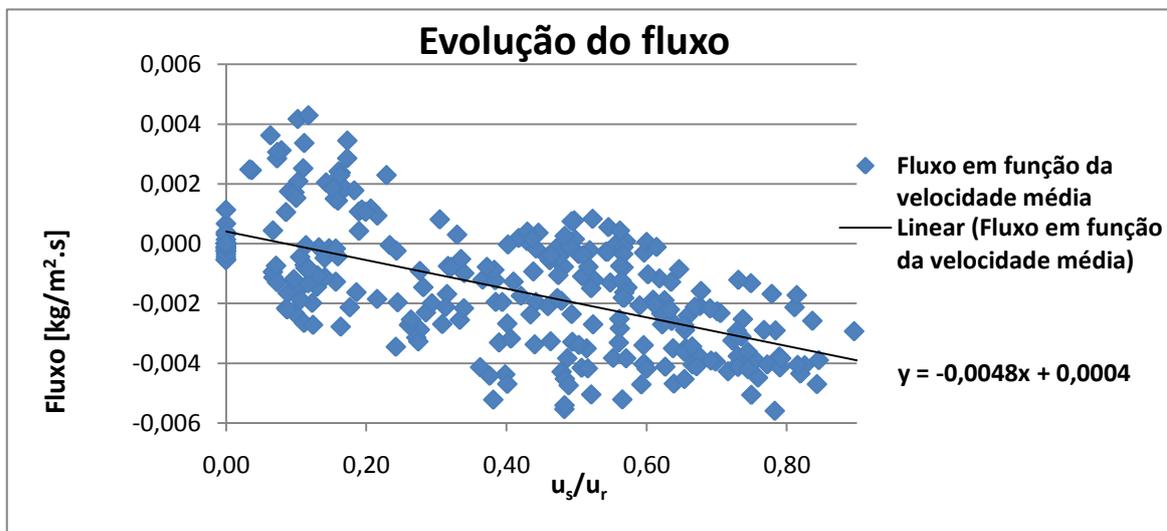


Figura 28 – Correlação do Fluxo de material erodido e da velocidade média, para o caso da pilha protegida por barreira porosa, situada a uma distância 2H, com orientação de 20°.

No caso da pilha protegida por barreira porosa, o gráfico da Figura 28, é um pouco mais esclarecedor, no que diz respeito à influência da velocidade, no fluxo. É visível que a maior quantidade de partículas arrastadas está associada aos maiores valores da velocidade do escoamento, conforme identificado através da linha de tendência, tal como havia sido visto nos casos da pilha desprotegida. Na Figura 29 mostra-se a variação do fluxo ao longo do eixo longitudinal:

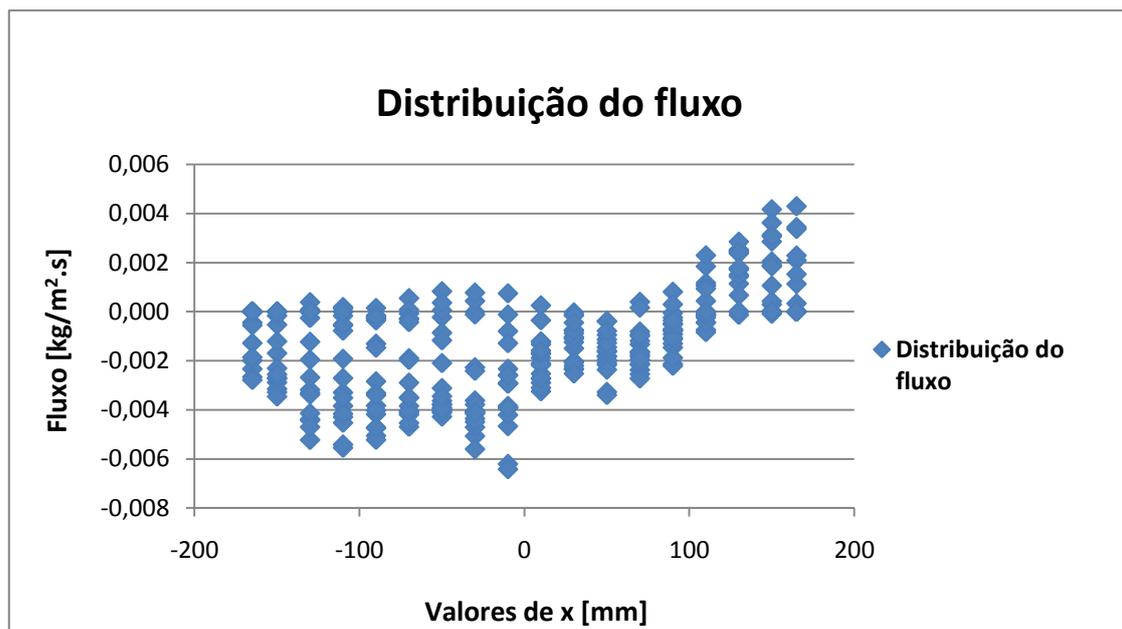


Figura 29 - Evolução do fluxo do material ao longo do seu eixo longitudinal, para o caso da pilha protegida por barreira porosa, situada a uma distância de 2H e com 20° de inclinação com a direcção do vento.

Mais uma vez, como era previsto, tendo em conta a linha tendência do fluxo, verifica-se uma maior erosão na zona montante da pilha e alguma deposição do material na zona oposta.

## 5. CONCLUSÃO

Após a apresentação e discussão de resultados, torna-se importante realçar os aspectos e conclusões mais relevantes do trabalho. O estudo incidiu sobre a simulação numérica do escoamento em torno de uma pilha erodida, tomando por base os casos experimentais testados. Esses casos são os da pilha desprotegida, pilha protegida por quebra-ventos sólidos, situados a diferentes distâncias (H, 2H, 3H, 4H) e com orientações  $\gamma = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  e  $40^\circ$ , e ainda os casos de pilhas protegidas por barreiras com 70% de porosidade e  $\gamma = 20^\circ$  e  $40^\circ$ , situadas às distâncias H e 2H.

Para todos estes casos existe informação sobre a forma da pilha erodida, em diferentes instantes de tempo, a partir da qual foram construídos os desenhos 3D, entretanto exportados para geração da malha necessária à simulação computacional (CFD). Assim, as geometrias estudadas reproduzem a forma das pilhas erodidas, conforme as medições efectuadas no túnel de vento.

Pretendia-se, com o presente trabalho, avaliar o potencial de utilização da simulação computacional na previsão do escoamento na proximidade da superfície da pilha sujeita à erosão. Para tal, correlacionou-se o fluxo erodido com a velocidade prevista numericamente, em diferentes situações.

Constatou-se que, nalguns dos casos estudados, essa correlação era razoavelmente satisfatória, nomeadamente nas situações da pilha desprotegida ou abrigada por uma barreira porosa.

Nos casos da pilha protegida por quebra-ventos sólidos, devido à existência de uma extensa zona de recirculação, muito material era arrastado para junto da barreira, pelo que não se verificou qualquer correlação entre o material erodido e a velocidade. Assim, concluiu-se que a ferramenta computacional não permite a estimativa do fluxo de erosão nesses casos. Ainda assim, permite obter uma estimativa para o campo de escoamento. Efectivamente, partindo das simulações no caso da barreira sólida, verificou-se que a velocidade do escoamento, contrária ao sentido do escoamento incidente, é particularmente intensa junto da face de montante da pilha, o que está de acordo com a observação experimental do arrastamento de material dessa zona para junto da barreira. Constatou-se

ainda que a recirculação é menos significativa para os casos das barreiras sólidas situadas à distância de  $3H$  e  $4H$ .

Nas situações de ventos laterais, aquelas em que as barreiras estão posicionadas obliquamente em relação ao escoamento incidente, verificou-se que a protecção é mais eficiente num dos lados da pilha, o que está de acordo com as medições experimentais da deformação da pilha. Nos casos das barreiras porosas, a velocidade prevista evidencia um visível decréscimo, comparativamente ao caso da pilha desprotegida, o que é coerente com a menor deformação medida nos ensaios experimentais.

Assim, pode concluir-se que, de uma forma geral, a simulação numérica é uma boa ferramenta para investigação destas situações, susceptível de fornecer uma boa estimativa para a velocidade esperada na proximidade da pilha. A informação obtida através do CFD pode assim ser usada para estimar o potencial de erosão.

---

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Badr, T., & Harion, J. (2005). Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. *Atmospheric Environment*, 39, 5576-5584.

Bagnold, R. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Mathuen.

Borges, A. R., & Viegas, D. X. (1988). Shelter effect on a row of coal piles to prevent wind erosion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29, 145-154.

EPA. (2006). *Industrial Wind Erosion* (chapter 13), <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0205.pdf>.

Ferreira, A., & Lambert, R. (2009). Computational and experimental study on the use of fences to control the wind erosion of a conical stockpile. *Environmental Fluid Mechanics*, DOI 10.1007/s10652-010-9176-x.

Gillette, D. (1974). On the production of soil wind erosion aerosols having the potencial for long range transport. *Journal of Research Atmosphere*, 8, 735-744.

Kind, R. J. (1990). Mechanics of aeolian transport of snow and sand. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 36, 855-866.

Lee, S., & Kim, H. (1998). Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77-78, 521-530.

Lee, S., & Kim, H. (1999). Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 311-326.

Lee, S., & Park, C. (1999). Surface pressure characteristics on a triangular prism located behind a porous fence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 69-83.

Perera, M. A. (1981). Shelter behind two-dimensional solid and porous fences. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 8, 93-104.

Raine, J., & Stevenson, D. C. (1977). Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 2, 159-180.

Raine, J., & Stevenson, D. C. (1977). Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 2, 159-180.

Sanchez, P, A, D. (2009) Modelação do escoamento no rasto de barreiras aerodinâmicas usadas para o controlo da velocidade do vento numa pista de remo e numa pilha cónica de areia. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.

Sismeiro, J, L. (2010). Estudo da erosão do vento, de pilhas de armazenamento. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.

Stunder, B. J., & Arya, S. P. (1988). Windbreak effectiveness for storage pile fugitive dust control: a wind tunnel study. *Journal Air Pollution Control Assoc.* , 38, 135-143.

Toraño, J., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J., & Pelegry, A. (2007). Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation. *Applied Mathematical Modelling* , 31, 2487-2502.

Toraño, J., Torno, S., Diego, I., Menendez, M., & Gent, M. (2009). Dust emission calculations in open storage piles protected by means barriers, CFD and experimental tests. *Environmental Fluid Mechanics*. 33, 3197- 3207.

Zingg, A. W. (1952). Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference*, 34, pp. 111-135. University of Iowa.