



Estudo da Erosão, por acção o vento, de pilhas de armazenamento

João Luís dos Santos Sismeiro

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em

Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Prof. Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Orientador: Prof. Doutor Almerindo Domingues Ferreira

Vogal: Prof. Doutor António Manuel Gameiro Lopes

Janeiro 2010

Agradecimentos

Na impossibilidade de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração do trabalho aqui apresentado, e existindo a possibilidade de omitir alguns dos seus nomes, gostaria de expor a todos eles a minha gratidão pela ajuda prestada.

Da vasta lista de nomes mereciam a devida referência, destacarei aqui alguns deles pelo envolvimento que tiveram neste trabalho.

Em primeiro lugar, e pela função desempenhada durante a elaboração desta tese, agradeço a meu orientador o Prof. Doutor Almerindo Domingues Ferreira, pelo apoio prestado, orientação, discussão de ideias e pela confiança que em mim depositou desde o primeiro instante.

Ao amigo, colega e Engenheiro Ricardo Abrantes agradeço “os vários minutos que passou a apanhar frio” na realização dos ensaios laboratoriais e a total disponibilidade com que sempre atendeu aos meus pedidos.

Gostaria de agradecer ao amigo, colega e futuro Engenheiro Miguel Coimbra pelas horas que me aturou no LAI.

Gostaria de agradecer ao Eng. Nuno, ao Eng. Nilton, à Isabel, ao Pedro e ao Hugo, pela ajuda prestada nos ensaios laboratoriais e porque sem essa ajuda não teria finalizado o presente trabalho.

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

Ao Tiago e à Ana por existirem.

À Patrícia por tudo...

Por último, e como os últimos são os primeiros, agradeço ao meu Pai e à minha Mãe, pela educação e bons valores transmitidos e por me proporcionarem todo o meu percurso académico.

A todos, o meu MUITO OBRIGADO.

Resumo

Apresenta-se, um estudo experimental da erosão, por acção do vento, de pilhas de armazenamento. O trabalho refere-se à realização de ensaios laboratoriais, efectuados em túnel aerodinâmico.

Inúmeros esforços têm sido feitos para combater a erosão eólica, e os problemas que a ela estão associados como a desertificação, a poluição ambiental, entre outros. O uso de barreiras artificiais tem sido uma das técnicas mais utilizadas para esse fim.

Este trabalho apresenta o estudo da erosão de uma pilha de armazenamento, de formato cónico, onde se simula dois casos, a erosão em pilha desprotegida e a erosão em pilha protegida com quebra ventos. Simularam-se dois tipos de barreiras artificiais, uma sólida com 0% de porosidade, e outra barreira com 70% de porosidade. Estudaram-se se as barreiras colocadas a várias distâncias da pilha, H, 2H, 3H e 4H, sendo H a altura da pilha e também colocadas com ângulos de 10°, 20° e 40°, em relação à direcção do escoamento.

O estudo aqui exposto baseou-se na análise da deformação temporal da pilha, em que se efectuaram medições da altura da pilha em determinados tempos de exposição ao escoamento, usando um mecanismo de medição laser.

Durante a apresentação e discussão de resultados apresentam-se comparações com outros estudos.

Palavras-Chave: Erosão Eólica, Pilha de Armazenamento, Túnel de vento, Quebra Vento, Deformação da pilha

Abstract

The thesis reports an experimental study of erosion by the wind, of storage piles. The work refers to laboratory tests carried out in a wind tunnel.

Numerous efforts have been made to combat wind erosion, and the problems that are associated with it such phenomenon, as desertification, environmental pollution, among others. The use of artificial barriers has been one of the most widely used techniques for this purpose.

This paper presents the study of erosion of a conical storage pile, which simulates two cases, the erosion in unprotected piles and erosion in piles with windbreaks. Two types of artificial barriers are studied here, namely a barrier with 0% porosity, and other barrier with 70% porosity. The barriers studied were placed at various distances from the pile, H , $2H$, $3H$ and $4H$, where H is the height of the pile, and also placed at angles of 10° , 20° and 40° , relatively to the undisturbed flow direction.

The study presented here is based on the analysis of the temporal deformation of the pile, where the height of the bulk has measured at several time intervals of exposure to flow, using a laser measuring mechanism.

The results from this work are compared against other previous studies.

Keywords: Wind Erosion, Storage piles, Wind Tunnel, Windbreak, Pile deformation

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	x
Nomenclatura	x
1 Introdução e Pesquisa bibliográfica	1
1.1 Introdução	1
1.2 Erosão Eólica	3
1.2.1 Motivação para o estudo da Erosão Eólica	4
1.3 Pesquisa Bibliográfica	4
2 Metodologia Experimental.....	7
2.1 Estudo experimental de referência.....	7
2.2 Caracterização da pilha de armazenamento e barreiras	9
2.3 Construção da pilha	11
2.4 Metodologia de trabalho	13
2.5 Tratamento de dados	14
3 Montagem Experimental	15
3.1 Túnel Aerodinâmico	15
3.2 Equipamento de medida.....	17
4 Apresentação e Discussão dos Resultado Obtidos.....	20

4.1	Avaliação da Repetibilidade	20
4.1.1	Teste ao Sensor Laser.....	20
4.1.2	Teste da repetição de construção da pilha.....	22
4.2	Resultados Obtidos nos Ensaios com Erosão	24
4.2.1	Resultado obtido em ensaios erosivos da pilha desprotegida	24
4.2.2	Resultados Obtidos nos Ensaios com Quebra Ventos.....	27
4.2.3	Resultados dos ensaios com a barreira colocada em ângulo.....	31
5	Conclusões	38
	Bibliografia	40

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Imagem Pilhas de Armazenamento de carvão (fonte: www.firstnations.de/img/05-0-money-b.jpg).....	8
Figura 2.3 – Pilha cónica estudada no presente trabalho.....	9
Figura 2.2 – Vista de topo da pilha com cónica. Círculos: posição dos termistores. Pontos: posição efectiva dos termistores com a rotação. (Adaptada de Stunder e Arya,1988).....	9
Figura 2.4 – Imagem do modelo sólido usado por Stunder e Arya (1988).	10
Figura 2.5 – Imagem das duas vedações utilizadas no processo experimental.	10
Figura 2.6 – Esquema da posição onde foram colocadas as barreiras.....	11
Figura 2.7 – Processo de construção da pilha (à esquerda), pilha construída (à direita).12	
Figura 2.8 – Malha utilizada para medir a pilha após cada intervalo de erosão.....	13
Figura 2.9 – Malha utilizada para medir a pilha não erodida.....	14
Figura 3.1 – Desenho do túnel aerodinâmico utilizados nos ensaios, adaptado de Ferreira (1999).....	15
Figura 3.2 – Túnel de vento do LAI (à direita) e a câmara de ensaios (à esquerda).	16
Figura 3.3 – Esquema do sistema de controlo e aquisição de dados utilizado na simulação experimental.	17
Figura 3.4 - Imagem da parte da câmara de ensaios onde se realizaram os experimento. Mecanismo de atravessamento e laser (em cima), pilha e barreira (em baixo).....	18
Figura 3.5 – Imagem do tubo de pitot.	19
Figura 4.1 – Imagem da pilha sem sofrer erosão.....	21
Figura 4.2 – Representação de um conjunto de ensaios realizados a uma pilha.	21

Figura 4.3 – Representação das medições realizadas com a repetição de construção da pilha.	23
Figura 4.4 – Exemplo de um modelo sólido utilizado no estudo da erosão. (Toraño, 2009).	24
Figura 4.5 – Deformação vertical da pilha sem protecção (NF) (vento aproxima-se da esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).	25
Figura 4.6 – Representação da simetria da deformação.	26
Figura 4.7 – Ilustração da deposição de material atrás da barreira sólida situada à distância $3H$	28
Figura 4.8 – Deformação da pilha, com a protecção sólida (SF) colocada à distância (DF) de H e $2H$ (aproximação do vento a partir da esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).	29
Figura 4.9 – Deformação da pilha, com a protecção sólida (SF) colocada à distância de $3H$ e $4H$ (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s)	30
4.10 – Representação da pilha protegida com a barreira colocada com um ângulo de 10°	31
Figura 4.11 – Representação do esquema da colocação das barreiras (ângulo $\gamma = 10^\circ, 20^\circ$ e 40°).	32
Figura 4.12 – Deformação da pilha protegida com a barreira de $\varepsilon = 70\%$ (F70), à distância H e colocada com um ângulo de $\gamma = 10^\circ$ (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).	33
Figura 4.13 – Deformação da pilha protegida com a barreira de $\varepsilon = 70\%$ (F70), à distância H e colocada com um ângulo de $\gamma = 20^\circ$ e 40° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).	34
Figura 4.14 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância H , ângulo de 0° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s), adaptado de Ferreira e Lambert (2009).	35

Figura 4.15 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância 2H, ângulo de 10° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).....	36
Figura 4.16 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância 2H, colocada com um ângulo de $\gamma = 20^\circ$ e 40° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).....	37

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Tabela do conjunto de ensaios representado na figura 4.2. 22

Nomenclatura

u – Velocidade do vento	[m/s]
U_0 – Velocidade máxima no perfil de velocidade	[m/s]
z – Altura sobre a superfície	[m]
δ – Espessura da camada limite	[m]
α – Expoente da lei de potência	
ΔP – Diferença de pressão	[Pa]
ρ – Massa volúmica	[kg/m ³]
ε – Porosidade da barreira	
t – Tempo de erosão	[minutos]
H – Altura da pilha	[m]
u^* - Velocidade de fricção	[m/s]
z_0 – Rugosidade de comprimento	
γ – Ângulo de colocação da barreira	[graus]

CAPÍTULO UM

1 Introdução e Pesquisa bibliográfica

1.1 Introdução

O presente trabalho insere-se na tese final de curso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

O tema proposto para investigação, neste trabalho foi o “Estudo/análise experimental da erosão provocada pelo vento, ao longo do tempo, em pilhas de armazenamento constituídas por material granular”.

A erosão define-se pelo conjunto de processos que implicam a remoção de partículas da superfície de um determinado material. Tem como principais agentes de transporte, a água, o vento, gelo. A erosão provocada pelo vento, também denominada por erosão eólica, tem dois efeitos principais. No primeiro, as partículas são deslocadas de uma zona para outra, e, no segundo, essas partículas em suspensão no escoamento colidem com a superfície granular causando a sua erosão. É nas zonas áridas, como desertos, ou em zonas com pouca vegetação, como as zonas agrícolas, que a erosão eólica mais se manifesta.

O homem tem recorrido à colocação de barreiras artificiais (cercas, vedações, muros) ou naturais (árvores, arbustos), com o objectivo de impedir a ocorrência deste fenómeno. Têm sido realizados vários estudos, ao longo dos anos, em que são analisadas as propriedades do escoamento em trono das barreiras, visando melhorar a eficiência das mesmas.

Neste trabalho propõe-se como objectivo principal, o estudo da erosão eólica em pilhas de armazenamento, com base em simulações em túnel aerodinâmico, analisando a deformação que o escoamento provoca na pilha em diversas situações.

Escolheu-se a modelação em túnel de vento pela sua facilidade de utilização e pela qualidade dos resultados que apresenta. Esta técnica é muito utilizado no estudo do vento, prende-se por utilizar modelos construídos à escala onde se tenta simular as principais características da situação real.

O estudo incidiu apenas num tipo de pilha, em que se estudaram várias situações, a erosão da pilha sem protecção, e a erosão da pilha protegida com dois tipos de barreiras, uma sólida e outra porosa. As protecções foram colocadas a várias distâncias, e também rodadas alguns graus em relação à direcção do escoamento.

Na abordagem do problema consideraram-se diversas fases, com objectivo de fasear o estudo e apresentar resultados de uma forma organizada e consistente.

Para isso, o presente trabalho foi estruturado em quatro etapas:

- Pesquisa bibliográfica;
- Estudo do mecanismo de medição de distâncias (equipamento laser);
- Realização de ensaios para testar a fiabilidade do mecanismo de medição;
- Realização de ensaios experimentais.

Este relatório encontra-se dividido em 4 partes. O presente capítulo apresenta uma primeira parte introdutória e uma segunda parte referente à pesquisa bibliográfica. No segundo capítulo expõe-se a metodologia seguida na realização das simulações experimentais, bem como uma breve referência ao estudo realizado por Stunder e Arya (1988), que serviu de base para comparação com o presente trabalho.

No capítulo três apresenta-se uma breve introdução aos mecanismos utilizados, onde se referem os principais aspectos da montagem experimental, assim como as características principais da instrumentação utilizada nos ensaios em túnel de vento. O capítulo quarto é dedicado à apresentação dos resultados obtidos nos experimentos, e nele serão analisados e discutidos todos os resultados obtidos durante a realização do trabalho.

Por fim, no capítulo cinco, apresenta-se uma discussão geral de todos os aspectos do trabalho, expondo-se as conclusões mais importantes retiradas na realização deste estudo.

1.2 Erosão Eólica

A erosão eólica é um fenómeno de arrastamento de partículas por acção do vento e é a maior causa de degradação dos solos em desertos ou zonas áridas. A erosão é caracterizada por ser um processo em que as partículas, por acção do escoamento, podem ser movidas da sua posição inicial para outra, quando o efeito do vento se sobrepõe às forças de coesão entre partículas.

Quando as partículas são expostas ao escoamento, e quando são atingidas as condições críticas para o seu deslocamento, estas são transportadas de uma posição para outra, sendo que a posição seguinte pode não ser a posição final. Isto é devido ao movimento constante de deposição/remoção de partículas, que pode provocar a alteração da superfície livre exposta, modificando assim desta forma as condições do escoamento, que vão alterar as características do transporte. Então, pode-se afirmar que a erosão é um processo iterativo e contínuo.

O movimento provocado por acção do vento em pequenas partículas pode ser classificado em três processos de transporte: saltação, suspensão e arrastamento/rolamento.

Segundo Lee *et al* (2002), a saltação é o movimento saltitante de partículas e é considerado como sendo o principal mecanismo de erosão eólica. Neste processo, as partículas envolvidas apresentam diâmetros entre 100 μm a 1000 μm . Os grãos, sob influência do escoamento e da gravidade, são elevados da superfície e movimentam-se em trajetórias curvas. Por sua vez, as partículas mais pequenas, com diâmetros inferiores a 100 μm , podem ser suspensas no ar e impelidas até grandes altitudes. A este processo dá-se o nome de suspensão.

No processo de suspensão, as pequenas partículas ficam suspensas, devido ao seu baixo peso, permanecendo no seio do escoamento aerodinâmico pela acção da turbulência em condições atmosféricas adversas (ex.: tempestades). As partículas finas podem ficar suspensas imenso tempo e viajar grandes distâncias, até se depositarem no solo por meio da chuva ou da neve.

O processo o arrastamento/rolamento consiste na migração de partículas ao longo da superfície, sem perdem o contacto com a mesma. As partículas envolvidas neste processo têm um diâmetro superior a 1000 μm , sendo pesadas demais para sofrerem saltação.

1.2.1 Motivação para o estudo da Erosão Eólica

Os materiais granulares estão presentes em muitos lugares na natureza e são o segundo material mais manipulado na indústria, segundo Richard (2005).

Com o desenvolvimento da indústria e a sua massificação global, existem por todo o mundo empresas, ligadas às mais variadas áreas, que detêm material granular (ex: areia, carvão, etc.) armazenado em grandes pilhas expostas ao vento. O material granular das pilhas, quando sujeito à erosão eólica, vai ser disperso na atmosfera, levando a um aumento da poluição atmosférica.

A poluição atmosférica é um problema ambiental transfronteiriço, que provoca efeitos nocivos, a curto ou longo prazo, constituindo, por isso, preocupação internacional. Esta problemática desencadeou a realização inúmeros estudos sobre os mecanismos de erosão e a tentativa de redução da emissão de poeiras. Foi com objectivo de colmatar algumas lacunas existentes nesta área, que se realizou este trabalho.

1.3 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 objectivo de conseguir uma visão, embora sumária, dos temas já abordados para uma melhor compreensão do problema, foi o factor que motivou a realização desta pesquisa.

O tema em estudo apresenta-se dividido em dois tipos de abordagem, experimental e computacional, sendo que a abordagem computacional tem sido cada vez mais utilizada para o estudo do presente tema. Na apresentação que se segue não se fez a divisão dos dois tipos de abordagens, pois em alguns trabalhos são apresentadas as duas em simultâneo.

Os estudos acerca da erosão eólica começaram a ter maior ênfase a partir da década de 40 do século passado, como é o caso do estudo de Bagnold (1941). Este investigador deu uma grande contribuição no estudo da deformação da superfície por

transporte de massa. O seu estudo combinava observações de zonas áridas, com estudos em túnel de vento, bem como a análise dos processos físicos do escoamento.

Gillette (1974) realizou inúmeros estudos em túnel de vento, demonstrando que a velocidade do vento é um factor de grande importância na erosão do solo.

Zingg (1952) estudou a circulação de materiais sedimentares e a saltação das partículas por meio de um ensaio de túnel de vento. Uns anos mais tarde, Kind (1990) aprofundou o estudo do processo da saltação mas, neste caso, o material usado foi a neve e areia.

As vedações ou protecções porosas, têm sido utilizadas como barreiras artificiais, com a finalidade de reduzirem a velocidade do vento. Vários foram os estudos efectuados com o objectivo de procurar saber qual o efeito dessas barreiras na diminuição do levantamento de partículas.

Borges e Viegas (1988) investigaram o efeito de abrigo numa pilha de carvão, na presença de barreiras artificiais porosas, através da medição da velocidade do vento no rasto da barreira. Estes afirmaram que era uma tarefa complexa a protecção de grandes áreas com barreiras porosas, no entanto, atestam que as mesmas apresentam a melhor solução. Por sua vez, Perera (1981), testou vários tipos de vedações, concluindo que a recirculação que se forma atrás das barreiras artificiais desaparece quando a porosidade é superior a 30%.

Raine e Stevenson (1977), efectuaram testes em barreiras com porosidades de 0%, 20%, 34% e 50%, medindo a velocidade do vento, concluíram que a barreira com 20% de porosidade apresentava em geral a maior redução da velocidade do vento.

Lee e Park (1998 e 1999) estudaram as variações de pressão na superfície de um prisma triangular colocado atrás de uma barreira porosa, através da alteração da mudança de porosidade, da altura da cerca, e da distância entre a protecção e o prisma.

Tal como no estudo anterior, Stunder e Arya (1988) realizaram ensaios em túnel de vento, medindo as velocidades de escoamento em torno de pilhas de armazenamento, através de modelos equipados com termistores, e, através da diferença de temperatura, determinaram a velocidade.

Lee e Kim (1998 e 1999) realizaram medições dos campos de velocidades em torno de um quebra-vento poroso, usando o método PTV (*Particle Tracking Velocimetry*), obtendo desta forma registos da turbulência e a distribuição da velocidade. Neste estudo, verificou-se que a barreira com porosidade 20%, provoca a

redução máxima da velocidade, e que a barreira com porosidade 40% possui características capazes de reduzir a erosão eólica, pois além de diminuir a velocidade, diminuía também a turbulência no rasto da barreira.

Judd *et al.* (1996), através da realização de ensaios em túnel aerodinâmico, examinaram o fluxo em torno de uma barreira porosa. Recorreram a dois métodos: à utilização de apenas um quebra-vento e a utilização de múltiplos quebra-ventos. Através da realização de vários ensaios, chegaram à conclusão que, a recirculação por de trás dos múltiplos quebra-ventos era menor, comparativamente à utilização de só um quebra-vento.

Existem também vários estudos, onde se recorreu à utilização de ferramentas de modelação numérica, para a simulação de escoamentos em torno de pilhas de armazenamento. Exemplo disso, foi o estudo realizado por, Badr e Harion (2005). O seu estudo consistiu na realização do estudo da emissão de poeiras em pilhas de armazenamento, com a simulação de duas geometrias e diferentes direcções de vento.

Toraño *et al.* (2007 e 2009) também, expõe várias simulações em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) sobre a emissão de poeiras em pilhas de armazenamento, e a influência que as barreiras artificiais e forma das pilhas têm nessa emissão, afirmando que a utilização de barreiras sólidas pode reduzir em 66% a emissão de poeiras, e que a forma da pilha altera bastante a emissão de poeiras.

A EPA (2006), apresenta um estudo sobre a previsão da quantidade de poeiras libertadas pela acção do vento, este tem sido a base da maioria dos estudos realizados.

Parecem existir relativamente poucos estudos experimentais, que utilizam partículas reais para testar barreiras artificiais. Além disso, a modelação requer que os modelos utilizados, sejam muito semelhantes aos reais, bem como as condições de fluxo de ar. Por isso, é bastante difícil simular o comportamento das partículas, sem estudar primeiro o seu comportamento.

No presente trabalho, face ao que se constatou na pesquisa bibliográfica, realizar-se-á um estudo, com base em experimentos efectuados em túnel de vento, da acção do escoamento aerodinâmico em pilhas de armazenamento totalmente expostas ou protegidas por barreiras artificiais, para melhor compreender o comportamento das partículas, face à acção do vento na presença de barreiras.

CAPÍTULO DOIS

2 Metodologia Experimental

Neste capítulo, apresenta-se a descrição dos procedimentos quando se realizaram os ensaios experimentais. Na primeira parte faz-se referência ao estudo -base do trabalho, referindo-se os aspectos mais importantes. Na segunda parte explica-se a metodologia usada nos ensaios, bem como o processo de construção da pilha e tratamento dos dados.

2.1 Estudo experimental de referência

Como se referiu no capítulo um, há numerosos estudos sobre a erosão. No entanto, poucos são os estudos em que é usado material granular, na simulação experimental.

A maioria dos trabalhos em que é estudada a erosão em pilhas de armazenamento, a investigação baseia-se no estudo efectuado pela US Environmental Protection Agency (EPA, 2006). Mas, segundo Ferreira e Lambert (2009), esse estudo não é directamente aplicável em situações onde existam barreiras, pois seria necessário desenvolver uma formulação apropriada.

Tomou-se então como base do presente trabalho, o estudo realizado por Stunder e Arya (1988). A investigação é realizada com base em ensaios em túnel de vento, simulando a camada limite atmosférica, com o objectivo de prever a quantidade de emissão de poeiras na erosão de pilhas de armazenamento.

A experiência foi realizada no EPA Meteorological Wind Tunel (MWT); trata-se de um túnel de vento, de baixa velocidade, com uma secção de teste 2,1 m de altura, com 3,7 metros de largura e 18,3 m de comprimento.

A camada limite simulada era caracterizada por uma espessura de 1 m, com a rugosidade de comprimento (z_0) igual a 0,012 mm, uma velocidade de fricção (u^*) de $0,048 U_0$, em que $U_0 = 4$ m/s é a velocidade de escoamento livre.

Aqueles dois autores utilizaram 2 modelos sólidos para o estudo, simulando duas formas de pilha, à escala 1:100, ambas com a mesma altura 0,11 m e com um ângulo de repouso de 37° . Uma possuía a forma de um cone e outra oval com o topo achatado. A forma das pilhas foi definida com base em várias formas de pilhas de carvão existentes nas centrais eléctricas (ver figura 2.1).



Figura 2.1 – Imagem Pilhas de Armazenamento de carvão (fonte: www.firstnations.de/img/05-0-money-b.jpg)

O estudo foi feito analisando a velocidade do escoamento em torno da pilha, e para isso utilizaram termistores. Estes foram colocados a cerca de 2 a 3 mm da superfície, (figura 2.2).

Estudaram dois tipos de barreiras, uma com porosidade igual a 50% e outra com 65%. Estudando várias dimensões (diferentes alturas e comprimentos), colocadas às

distâncias $1H$ e $3H$, em que H é altura da pilha. Realizaram ainda dois estudos adicionais, com a direcção do vento a 20° e 40° .

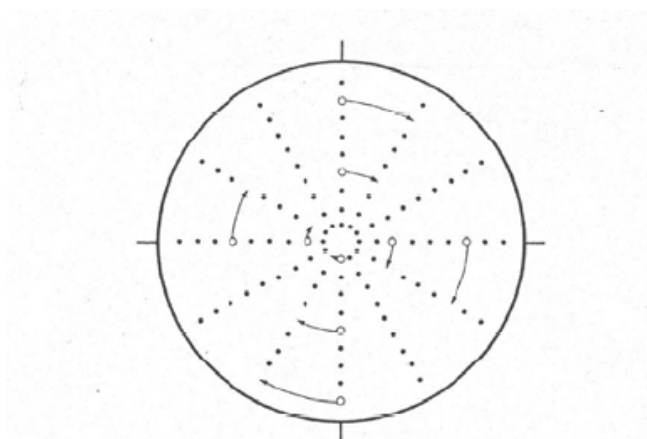


Figura 2.2 – Vista de topo da pilha com cónica. Círculos: posição dos termistores. Pontos: posição efectiva dos termistores com a rotação. (Adaptada de Stunder e Arya,1988).

2.2 Caracterização da pilha de armazenamento e barreiras

Com base no estudo apresentado no subcapítulo 2.1, usou-se para o presente trabalho, um modelo a escala 1:100 de pilha de armazenamento de 11 m de altura que, segundo Stunder & Arya (1988), corresponde às pilhas usadas na maioria das centrais eléctricas. A pilha apresenta uma altura de 110 mm e o diâmetro da base da pilha não erodida é de 340 mm (ver figura 2.3).



Figura 2.3 – Pilha cônica estudada no presente trabalho.

O modelo sólido usado por Stunder & Arya (1988) apresenta um diâmetro de base de 290mm e um ângulo de repouso de 37°. No presente estudo o ângulo variava entre os 33°-34°, determinado através de medições efectuadas e de acordo com Ghasavi *et al.* (2008).

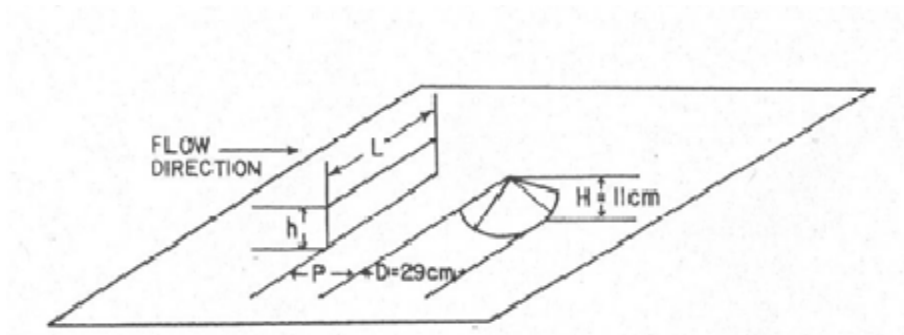


Figura 2.4 – Imagem do modelo sólido usado por Stunder e Arya (1988).

Foram utilizados 2 tipos de quebra ventos, uma vedação sólida (SF), porosidade $\epsilon=0\%$ e uma vedação porosa com porosidade de 70% (F70).

A vedação sólida foi construída a partir de madeira com 5 mm de espessura, enquanto a vedação porosa é feita de material sintético, como se pode observar na figura 2.5.

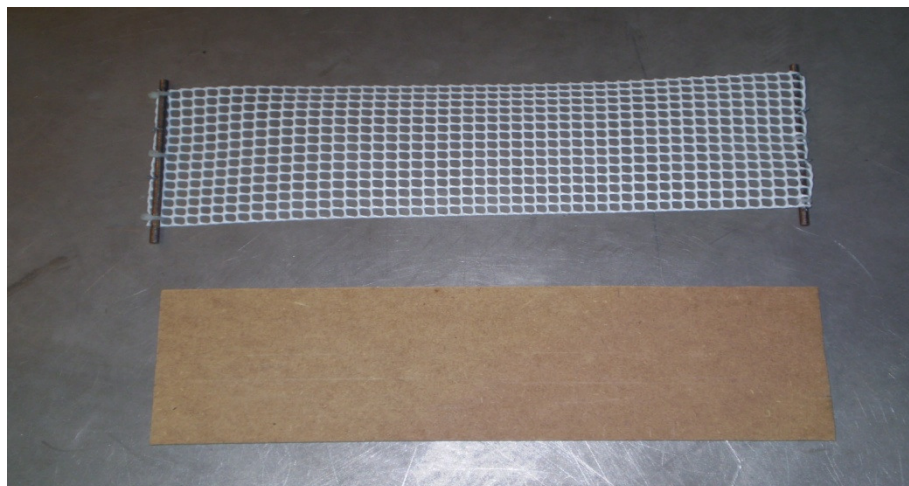


Figura 2.5 – Imagem das duas vedações utilizadas no processo experimental.

Tomou-se a opção de que dimensão das barreiras correspondesse à altura e diâmetro da pilha não erodida, sendo a altura da vedação (H) igual à altura da pilha e a largura da vedação (L) igual ao diâmetro da pilha, pois de acordo com Stunder & Arya

(1988), quebra ventos cujas dimensões são inferiores às da pilha apresentam um comportamento pior em relação a quebra ventos em que dimensões são iguais aos da pilha. Por outro lado, aqueles autores também salientam que as barreiras com dimensões superiores às da pilha, em largura e em altura, apresentam resultados em tudo similares aos apresentados por barreiras com as mesmas dimensões.

A vedação sólida colocou-se a montante da pilha, às distâncias de H , $2H$, $3H$ e $4H$ medidas a partir da base. A vedação com porosidade 70% foi estudada para valores do ângulo com o escoamento de 10° , 20° e 40° em relação à posição normal da barreira, à distância H e $2H$ da pilha, com se observa na figura 2.6.

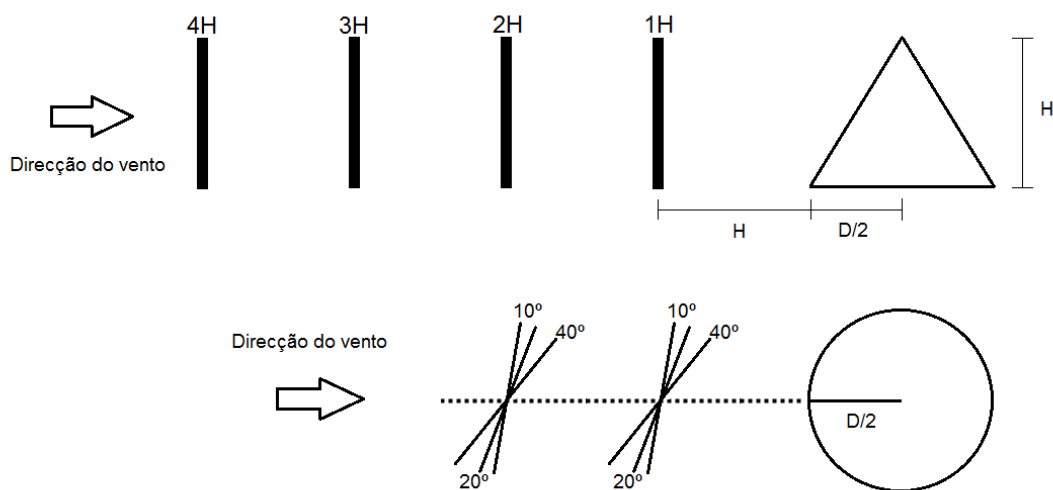


Figura 2.6 – Esquema da posição onde foram colocadas as barreiras.

2.3 Construção da pilha

O material granular é definido com sendo um aglomerado de partículas sólidas, que não apresentam forças de coesão entre si. Para a simulação deste tipo de material seleccionou-se a areia, pois sendo considerada um material granular e não apresenta dificuldades na sua aquisição.

Para uniformizar o tamanho de grão utilizou-se uma peneira, para crivar a areia ficando esta com um tamanho de grão predominante de 0,5mm. Além disso, este processo impede também que a amostra tenha impurezas.

O processo de construção da pilha baseia-se, na utilização de uma estrutura com a altura igual à que se pretende dar à pilha, neste caso 0,11 m, que irá suportar um funil pelo qual era depositada a areia (ver figura 2.7). Essa estrutura é colocada numa posição específica, à qual é atribuída a origem (0,0).

Com a estrutura montada e colocada no ponto de origem definido, a areia é vertida para o funil até atingir a altura da estrutura. Ao atingir esse ponto a pilha considera-se construída, e é retirado todo o material auxiliar utilizado. É de salientar que a estrutura tem de retirada com muito cuidado, pois à mínima vibração a areia pode escorregar do topo da pilha, diminuindo-se assim a altura desejada para a pilha.

Na figura 2.7 ilustra-se a estrutura utilizada na construção da pilha bem como o processo de construção.

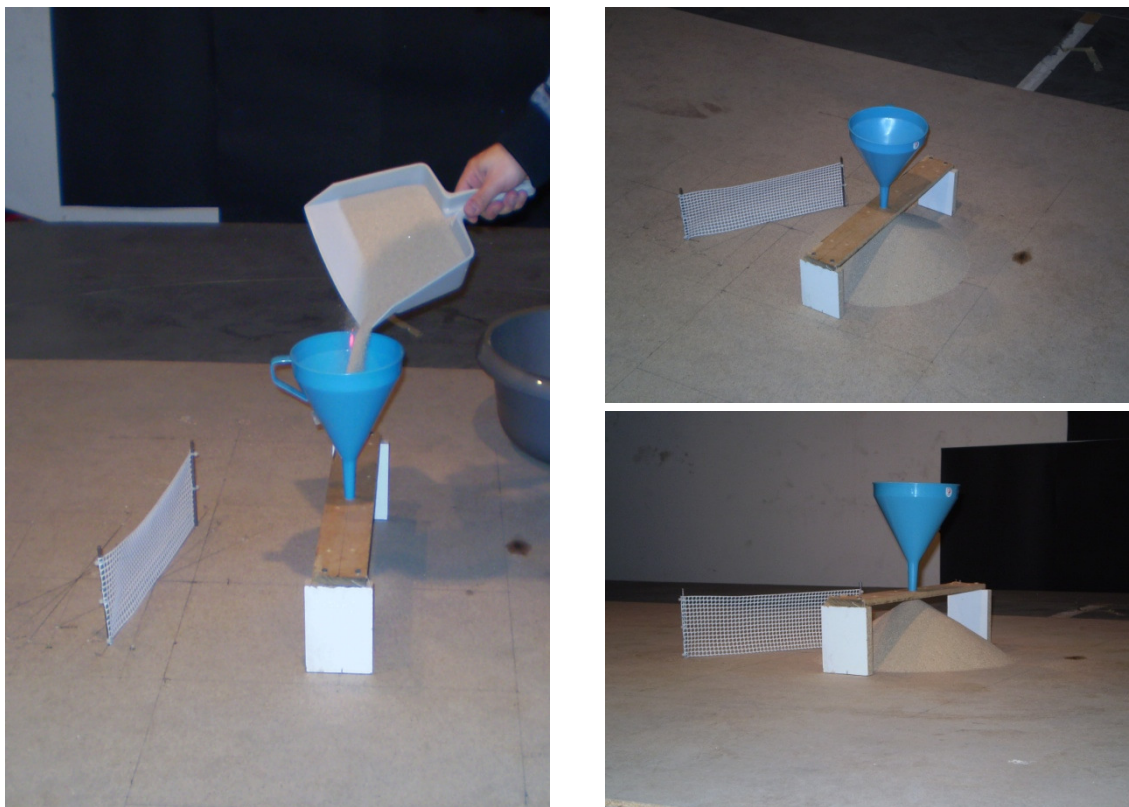


Figura 2.7 – Processo de construção da pilha (à esquerda), pilha construída (à direita).

2.4 Metodologia de trabalho

O procedimento experimental tem como base a medição da altura da pilha em determinados pontos pré-estabelecidos, após esta estar exposta ao escoamento.

Cada processo de erosão apresentado neste trabalho é composto por quatro tempos totais de exposição ao escoamento, respectivamente 2, 5, 10 e 20 minutos. O método efectuado é composto pelos seguintes passos:

- Construção da pilha e colocação da barreira (ou não, dependendo do caso em estudo);
- Exposição da pilha ao escoamento durante 2 minutos;
- Medição da altura da pilha em determinados pontos através do equipamento laser;
- Exposição da pilha ao escoamento durante mais 3 minutos, perfazendo assim 5 minutos;
- Nova medição com o laser;
- A pilha é novamente exposta ao escoamento, durante mais 5 minutos perfazendo 10 minutos de erosão;
- Nova medição com o laser;
- A pilha é exposta ao escoamento durante mais 10 minutos, completando assim os 20 minutos de erosão.
- Medição da altura final da pilha após os 20 minutos de exposição ao escoamento.

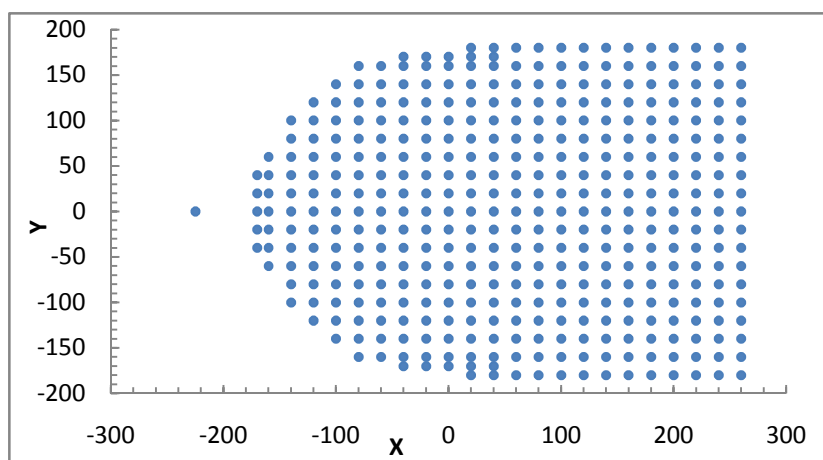


Figura 2.8 – Malha utilizada para medir a pilha após cada intervalo de erosão.

O laser usado para medir as distâncias apresenta uma precisão de 0,5 mm, é controlado através de um programa de computador, tal como o mecanismo de atravessamento que o faz movimentar, o modo de funcionamento de ambos encontra-se exposto no capítulo 3.

Para a realização das medições foram usadas dois tipos de malha, um para medir a pilha não erodida e outro para a pilha após a erosão (ver figuras 2.8 e 2.9).

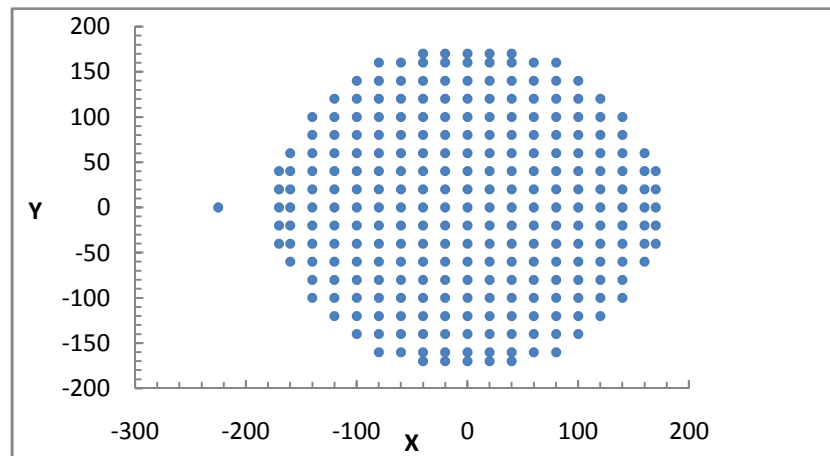


Figura 2.9 – Malha utilizada para medir a pilha não erodida

2.5 Tratamento de dados

Em relação ao tratamento de dados, depois de estes serem adquiridos através do sensor, eram trabalhados em Microsoft Excel, antes de serem utilizados no Tecplot 360, onde se representou a deformação da pilha.

Como o sensor lê a altura total, desde o ponto de leitura até a altura a que se encontra o sensor, os dados eram manipulados para se obter a altura real da pilha.

CAPÍTULO TRÊS

3 Montagem Experimental

Expõe-se, no presente capítulo, as características principais dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais, incluindo o túnel aerodinâmico e o equipamento de medida. Todo o equipamento utilizado que é referido neste capítulo encontra-se instalado no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI).

3.1 Túnel Aerodinâmico

Para a realização dos ensaios, recorreu-se ao túnel aerodinâmico existente no Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI).

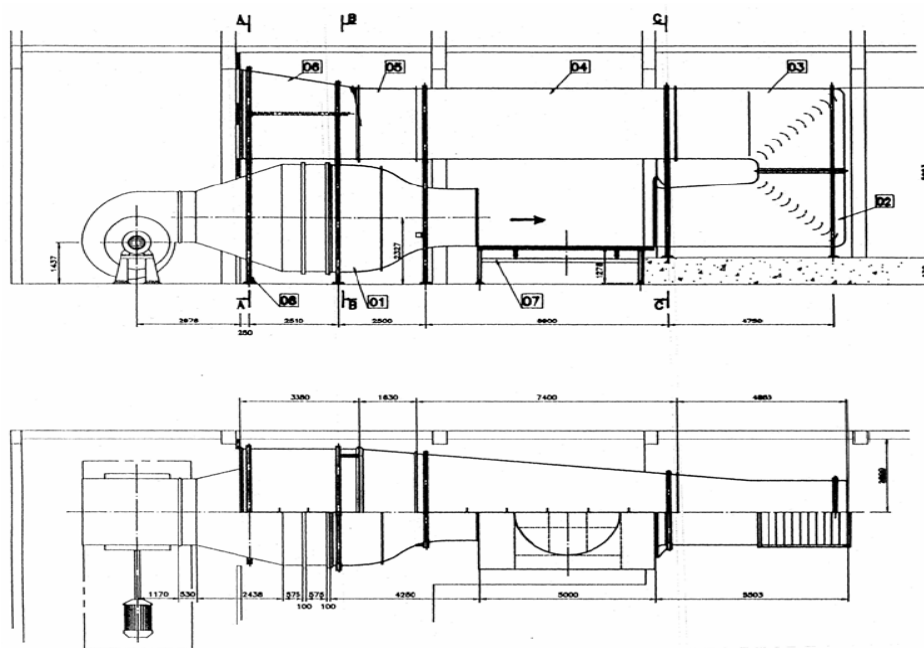


Figura 3.1 – Desenho do túnel aerodinâmico utilizados nos ensaios, adaptado de Ferreira (1999).

A figura 3.1 apresenta um esquema, à escala, do túnel aerodinâmico. Trata-se de um equipamento que dispõe de uma câmara de ensaios aberta de 5 m de comprimento e 2 m de largura, apresentando uma secção de saída de forma quadrada com 2 m de lado.

É composto por um ventilador do tipo centrífugo, que é accionado por um motor eléctrico com uma potência de 230 KVA que permite atingir uma velocidade máxima na câmara de ensaios de aproximadamente 18 m/s. A generalidade dos ensaios foi realizada para velocidades inferiores a 10 m/s, nomeadamente 6,8 m/s.

Os testes ao escoamento na câmara de ensaios para condições de vazio, mostraram que se poderia considerar a velocidade do ar transversalmente uniforme apenas na zona central, numa faixa com 1 m de largura, de acordo com Ferreira (1999). Segundo aquele autor o perfil da componente média da velocidade pode ser descrito pela seguinte lei de potência,

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

em que u é a componente média da longitudinal da velocidade, U_0 é a velocidade de referência do escoamento, e $\alpha = 0,11$. A espessura da camada limite (δ) é de 0,4 m a 3 metros de distância do início da câmara de ensaios. A intensidade de turbulência pode-se considerar constante e igual a 15%.



Figura 3.2 – Túnel de vento do LAI (à direita) e a câmara de ensaios (à esquerda).

3.2 Equipamento de medida

Para a realização dos ensaios experimentais, recorreu-se a uma estação de medida, cujos principais componentes são um mecanismo de atravessamento ao qual está acoplado um sensor laser, este mecanismo é controlado por um programa de computador, que orienta simultaneamente o sensor e o mecanismo. Na figura 3.3 mostra-se uma representação esquemática do sistema de aquisição de dados.

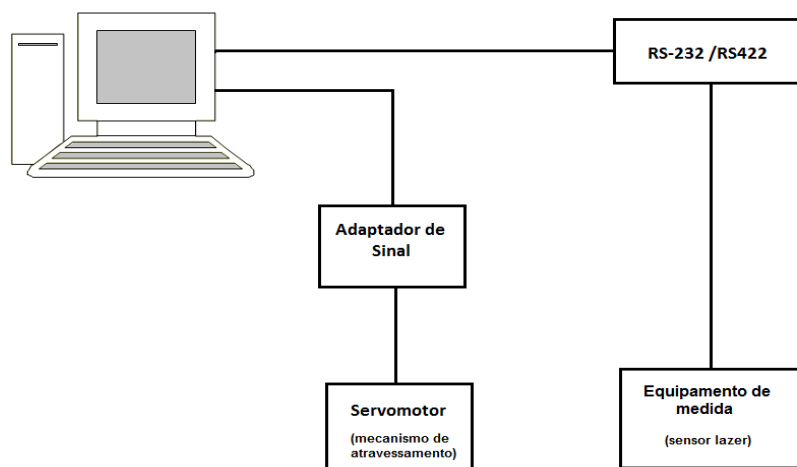


Figura 3.3 – Esquema do sistema de controlo e aquisição de dados utilizado na simulação experimental.

No presente trabalho entende-se por mecanismo de atravessamento o sistema de posicionamento constituído por 2 fusos controlados por dois motores eléctricos, os quais transportam o sensor laser através de movimentos longitudinais e transversais.

Este equipamento foi projectado e construído por Gonçalves (2008), fazendo parte do seu projecto final de dissertação de mestrado. Destina-se a efectuar medidas, da deformação da superfície de um material granular provocada por um escoamento aerodinâmico, mas sem interferir com o mesmo.

Segundo Gonçalves (2008), o sensor instalado é da marca DIMETRIX, modelo DLS-B(H) 15. Apresenta como principais características uma precisão de 0,5 mm, podendo medir distâncias compreendidas entre 0,2 e 500 metros, podendo assim ser colocado num local que não interfira como escoamento de ar. O mecanismo encontra-se instalado na parte superior da câmara de ensaios do túnel de vento.

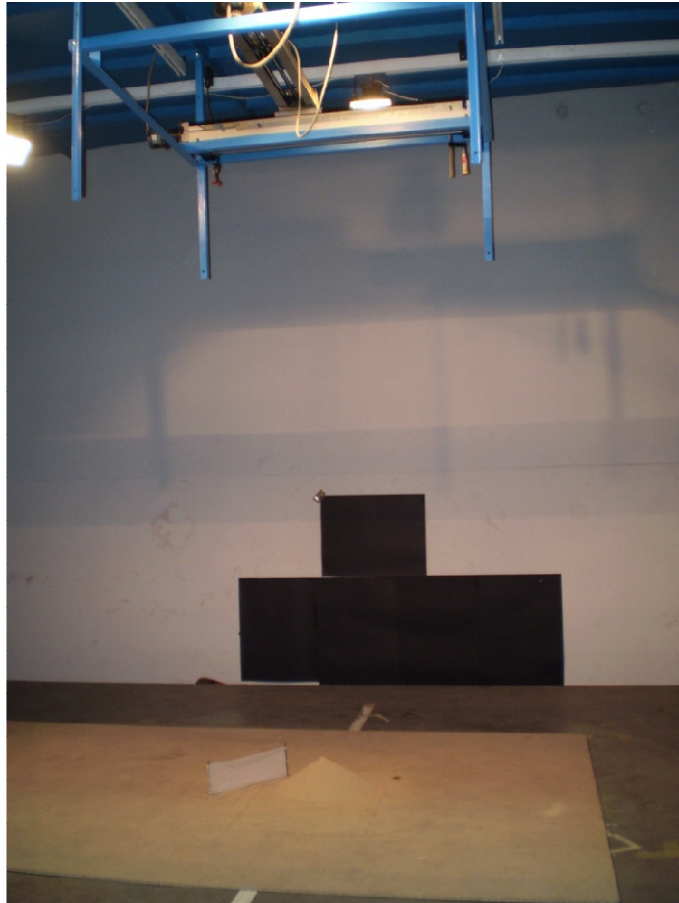


Figura 3.4 - Imagem da parte da câmara de ensaios onde se realizaram os experimento. Mecanismo de atravessamento e laser (em cima), pilha e barreira (em baixo).

Na questão referente ao controlo do equipamento, mecanismo e sensor, existe uma aplicação elaborada em LABVIEW, programa cujo nome é “Erosão”, desenvolvida por Gonçalves (2008). O programa permite dois tipos de funcionamento, o “Manual” e o “Automático”, que se diferenciam apenas na maneira como são fornecidos os pontos de leitura ao programa, no primeiro o operador insere-os directamente na interface gráfica do programa, no segundo os pontos são fornecidos através de um ficheiro seleccionado pelo utilizador.



Figura 3.5 – Imagem do tubo de pitot.

Para a determinação de velocidade de escoamento não-perturbado, utilizou-se um tubo de Pitot-static com um diâmetro de 6 mm.

As leituras de pressão eram efectuadas por um transdutor de pressão eléctrico, da marca MULTUR. Através dessas leituras era determinada a velocidade de escoamento a partir da expressão (2).

$$V \cong \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

CAPÍTULO QUATRO

4 Apresentação e Discussão dos Resultado Obtidos

Neste capítulo far-se-á a apresentação e discussão dos resultados obtidos. A obtenção foi feita, exclusivamente, através da simulação experimental em túnel de vento e referem-se a medições de deformação da pilha em pontos pré-estabelecidos. Expõem-se ainda os resultados sobre os testes de repetibilidade das medições do sensor e de construção das pilhas de areia. Foram estudadas as situações em que a pilha sem encontra desprotegida e com protecção sólida e porosa.

Durante a discussão dos resultados fazem comparações dos resultados com os resultados obtidos em outros trabalhos, e também com algumas simulações numéricas, tentando-se, assim, comparar simulações numéricas com os resultados experimentais obtidos.

4.1 Avaliação da Repetibilidade

4.1.1 Teste ao Sensor Laser

Para a realização das medições foi utilizado uma estação de medida, composta por laser e mecanismo de atravessamento, dirigido por um programa de computador, o qual já foram caracterizados no capítulo três.

Com o intuito de analisar o comportamento do mecanismo de atravessamento e laser, assim como desenvolver alguma destreza na utilização do programa “Erosão”, realizaram várias medições para determinar a repetibilidade, do sensor. Os ensaios

foram realizados em pilhas cónicas não erodidas, com 0,11 m de altura e 0,34 m de diâmetro de base, dimensões padrão adoptadas em todo o procedimento experimental.

A figura 4.1, apresenta uma das pilhas não erodidas que se utilizaram na realização dos testes ao sensor.



Figura 4.1 – Imagem da pilha sem sofrer erosão.

A pilha foi construída com o centro na posição conhecida por (0,0), com foi explicado no capítulo 2 na parte referente à construção da pilha. Todos os ensaios foram efectuados partindo do mesmo ponto de início e fim de medições, utilizando a malha de pontos (ver figura 2.9, capítulo dois).

A figura 4.2 apresenta um dos conjuntos de medições realizadas para fazer o teste ao sensor.

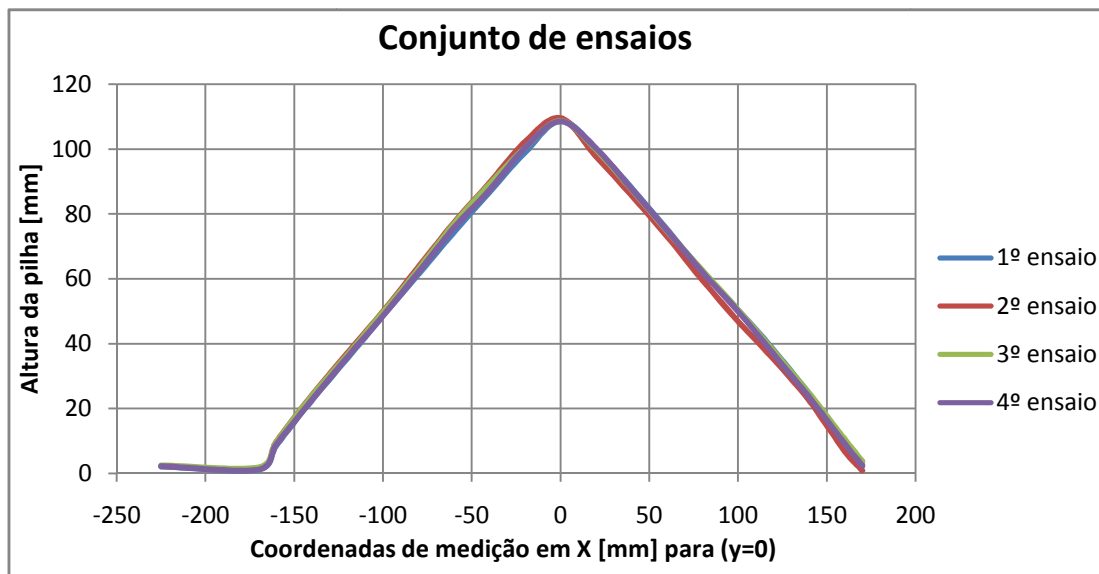


Figura 4.2 – Representação de um conjunto de ensaios realizados a uma pilha.

Ao longo dos 4 ensaios representados na figura 4.2, realizados à mesma pilha cônica, observa-se que este apresenta leituras relativamente iguais, pois não se conseguem individualizar as curvas dos vários ensaios.

Tabela 4.1 – Tabela do conjunto de ensaios representado na figura 4.2.

X [mm]	Nº de pontos	Altura [mm] 1º Ensaio	Altura [mm] 2º Ensaio	Altura [mm] 3º Ensaio	Altura [mm] 4º Ensaio	Média	Desvio padrão [mm]	Desvio médio [mm]
-225	1	2,075	2,175	2,450	2,200	2,225	0,159	0,113
-170	2	1,175	1,525	1,900	1,200	1,450	0,340	0,263
-160	3	8,675	9,825	9,825	9,025	9,337	0,581	0,488
-140	4	22,600	24,075	23,900	22,650	23,306	0,790	0,681
-120	5	35,525	37,150	36,600	35,950	36,306	0,715	0,569
-100	6	48,650	49,900	49,625	48,550	49,181	0,682	0,581
-80	7	61,500	63,625	63,000	62,100	62,556	0,942	0,756
-60	8	74,400	77,275	76,950	75,725	76,088	1,308	1,025
-40	9	86,750	89,575	89,150	87,375	88,213	1,363	1,150
-20	10	99,025	102,250	100,400	100,350	100,506	1,325	0,872
0	11	108,800	109,500	108,600	108,475	108,844	0,458	0,328
20	12	100,000	97,650	99,750	100,175	99,394	1,176	0,872
40	13	87,975	85,650	87,450	87,675	87,187	1,047	0,769
60	14	75,175	73,000	74,650	74,875	74,425	0,974	0,712
80	15	62,225	59,475	62,500	61,925	61,531	1,391	1,028
100	16	50,400	46,825	50,375	49,925	49,381	1,718	1,278
120	17	38,075	35,200	37,650	36,725	36,912	1,273	0,950
140	18	24,475	22,450	24,625	23,450	23,750	1,012	0,800
160	19	9,775	6,800	10,550	9,175	9,075	1,618	1,138
170	20	2,600	0,850	3,750	2,250	2,362	1,195	0,813

Analisando os dados obtidos, confirma-se que o sensor apresenta um elevado poder de repetição, como se mostra na tabela 4.1, o desvio médio apresentado não excede os 2 mm, verificando-se assim a boa repetibilidade do sensor.

4.1.2 Teste da repetição de construção da pilha

No decorrer dos testes ao sensor levantou-se a seguinte questão: será que se conseguirá construir pilhas sempre com as mesmas dimensões? Reconheceu-se então que, seria importante realizar um estudo sobre a verosimilhança da construção e

reconstrução da pilha cónica de areia. Além disso, como se tinha verificado a repetibilidade nas medições feitas com o sensor, admitiu-se que testando também a construção repetitiva da pilha, completaria a avaliação do comportamento do sensor e do método de construção da pilha, podendo assim validar os resultados obtidos.

Para isso, realizaram-se vários ensaios com leitura do perfil da pilha não erodida, em que a pilha era reconstruída sempre antes de se iniciar a medição. Para que medição fosse mais rápida, neste caso realizaram-se medições em x para $y=0$, e em y para $x=0$, facilitando também o tratamento de dados. Observando a figura 4.3, excluindo erros de leitura por parte do sensor, pode aferir-se que existem algumas diferenças nas medições efectuadas. O topo da pilha é a zona em que essas diferenças são mais notórias, embora sejam de apenas 1 a 2 milímetros, pelo que se identificam com alguma facilidade.

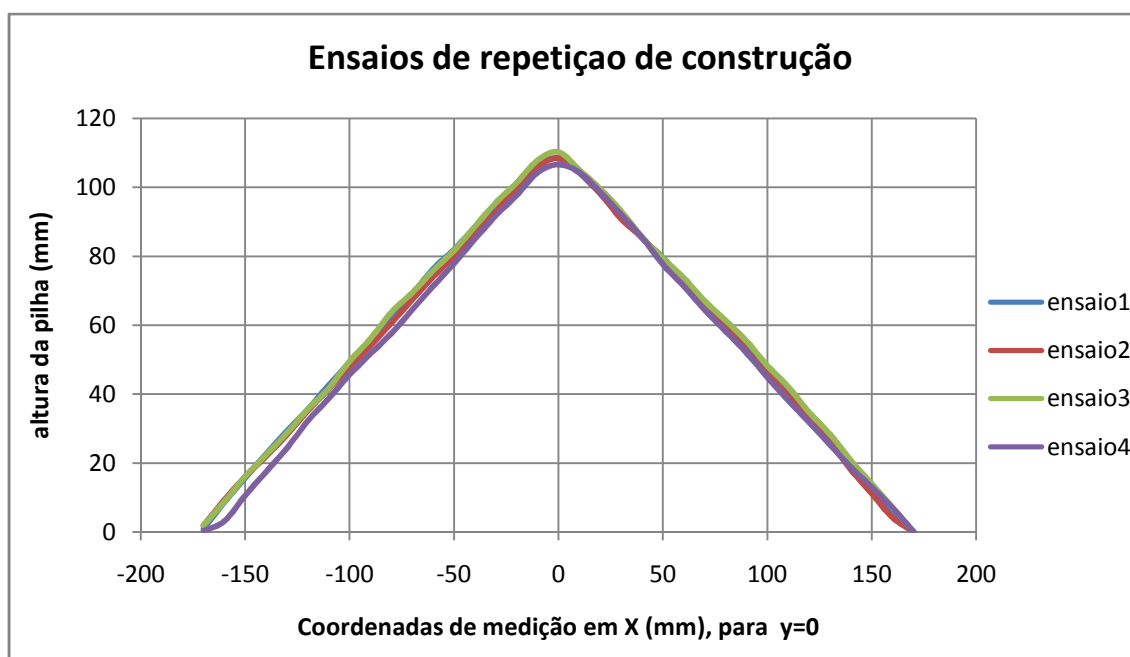


Figura 4.3 – Representação das medições realizadas com a repetição de construção da pilha.

Este fenómeno advém do facto da areia ser um material granular, apresentando como principal característica, o facto de não existirem forças de coesão entre as partículas que a constituem. Devido a esta particularidade, que é comum a qualquer material granular, torna-se difícil construir uma pilha exactamente igual a outra, pois basta a mínima vibração para se dar o “escorregamento” da areia do topo diminuindo a altura da pilha e influenciando também o ângulo de repouso. Esta peculiaridade é pouco referida nas investigações anteriores, pois muitas delas utilizam modelos sólidos

(Stunder e Arya, 1988) ou então se é utilizado algum material granular, a pilha é construída com o auxílio de outros materiais, tal como o modelo construído em metal que Toraño *et al.* (2009) apresentam no seu estudo (ver figura 4.4).

O facto de a pilha ser totalmente constituída por um material granular, torna a abordagem realizada neste presente trabalho mais realista, pois as pilhas à escala real também não possuem sempre as mesmas dimensões, facto proveniente da forma como são construídas e, claro, da acção da erosão.



Figura 4.4 – Exemplo de um modelo sólido utilizado no estudo da erosão. (Toraño, 2009).

4.2 Resultados Obtidos nos Ensaios com Erosão

Como já se referiu anteriormente foram realizados vários ensaios, onde se pretendeu estudar a erosão eólica em pilhas de armazenamento. Nesta parte do capítulo referir-se-ão os resultados obtidos no estudo da erosão, em pilhas protegidas tendo sempre como valor de referência a pilha desprotegida.

4.2.1 Resultado obtido em ensaios erosivos da pilha desprotegida

Neste caso a análise centra-se na avaliação da acção do escoamento aerodinâmico na pilha desprotegida, tentando aferir se a deformação induzida é simétrica, visto ser este

o caso de referência. Fizeram-se algumas simulações sempre com a pilha sem protecção, representada na figura 4.1 deste mesmo capítulo.

Como era de esperar a deformação da pilha é visível, mesmo só estando exposta ao escoamento durante 2 minutos, como se observa na figura 4.5 da imagem na parte superior esquerda, a deformação é mais acentuada na zona onde o escoamento incide existindo uma deposição de material a jusante da pilha (lado esquerdo, assinalada com cor amarela e laranja).

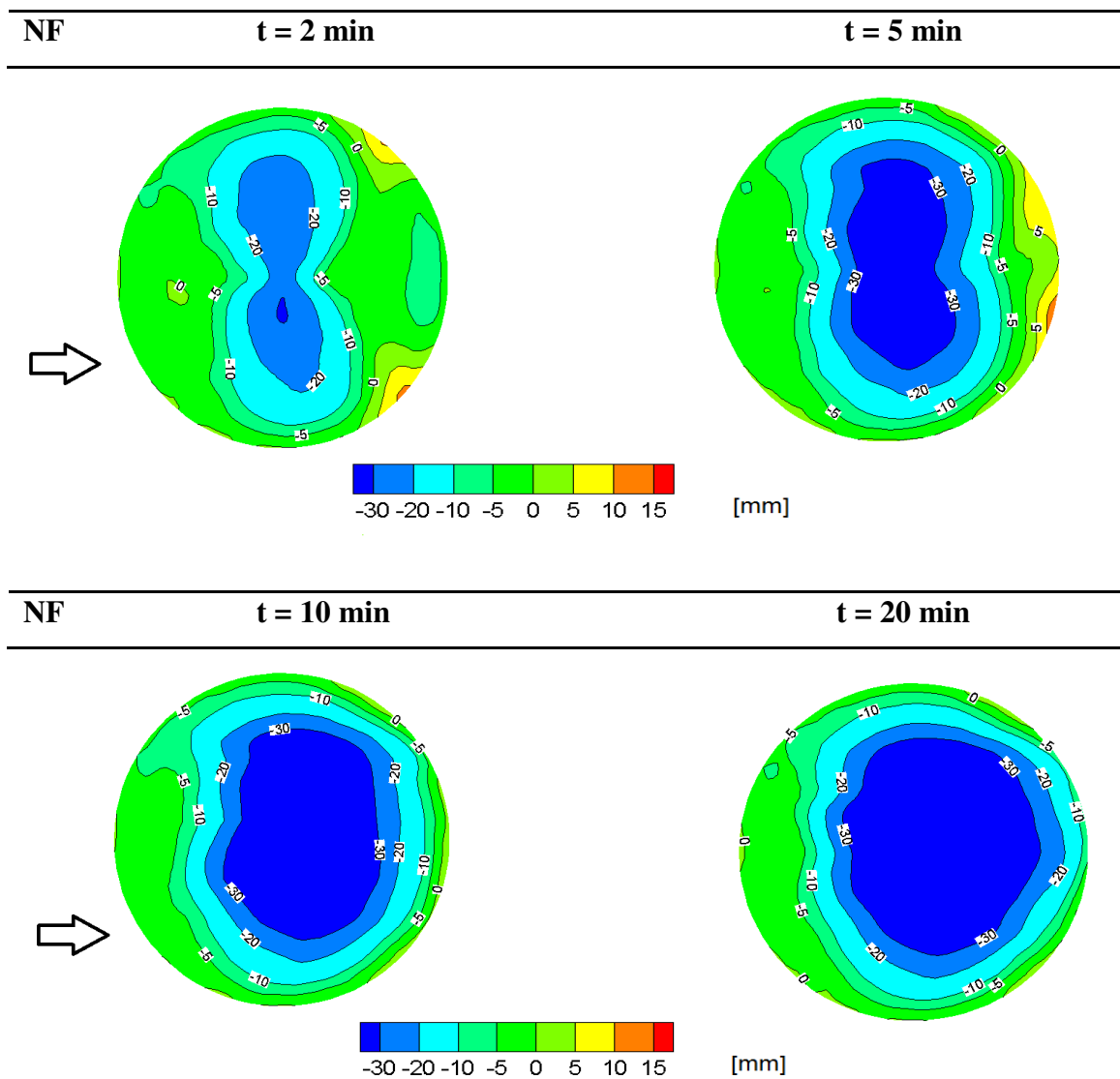


Figura 4.5 – Deformação vertical da pilha sem protecção (NF) (vento aproxima-se da esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s)

Neste trabalho admitiu-se que nas áreas de erosão os valores apresentados sejam negativos, visto que existe uma redução do volume da pilha e os valores positivos correspondem às áreas onde se acumulam partículas. Os ensaios foram todos realizados a uma velocidade de 6,9 m/s. Aproximadamente 24,8km/h, que segundo a escala de Beaufort é um vento considerado moderado.

Na figura 4.5 está representada uma deformação completa nos instantes $t=2, 5, 10$ e 20 minutos. Observando-se a elevada deformação imposta pelo escoamento no instante $t=20$ minutos, é de salientar que esta situação já era esperada.

Reconheceu-se a importância da análise de simetria de deformação da pilha quando se realizaram os primeiros testes. O facto de se efectuar a leitura de um conjunto de pontos que abrange a área total pilha, torna o processo de medição um pouco demoroso. O tempo de medição poderá ser reduzido caso exista simetria. Foi com base nisto que se procedeu ao estudo da simetria.

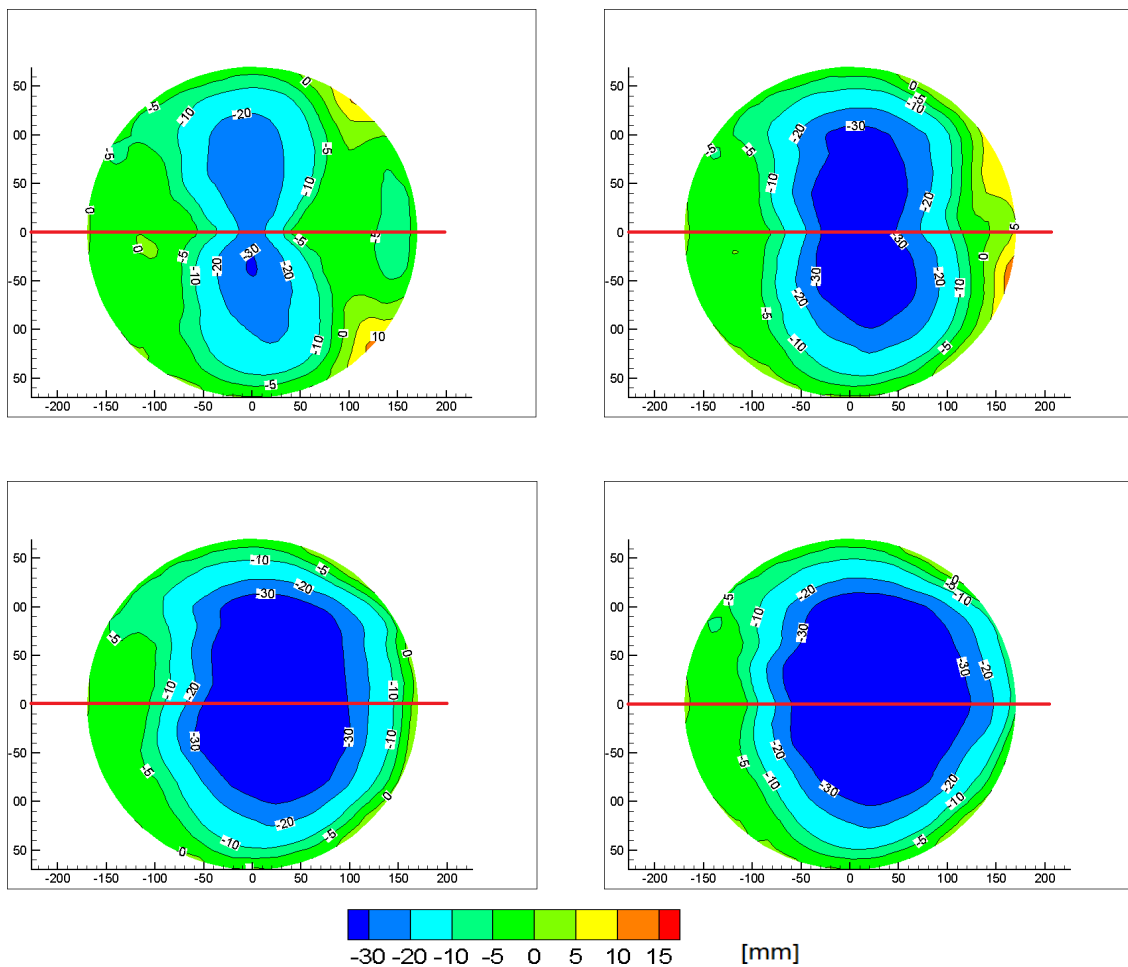


Figura 4.6 – Representação da simetria da deformação.

Como se observa na figura 4.6, o estudo baseou-se na análise dos gráficos obtidos nas diversas simulações efectuadas. Foram desenhadas rectas no centro da pilha ($y=0$) paralelas ao escoamento, dividindo-se assim a pilha. Com isto observou-se que existe bastante semelhança entre as duas partes. Não podemos afirmar que a deformação é totalmente simétrica, pois em alguns casos existem diferenças. A identificação destas dissemelhanças pode ter origem, no simples facto de que sempre que se ligava o túnel de vento se utilizava uma placa de madeira para proteger o modelo durante a fase de aceleração. Como o túnel necessitava de ser acelerado até a velocidade pretendida na simulação, com a placa evitava-se que ocorresse erosão antes de o escoamento atingir a velocidade desejada. Então, o simples retirar dessa placa pode estar na origem dessas diferenças de deformação. Além disso, essas pequenas diferenças podem ter origem pelo simples facto de o escoamento não ser sempre uniforme.

Em suma, poderá apresentar-se a deformação como sendo simétrica, pois apesar de existirem diferenças, estas não são significativas. Assim, poder-se-à medir só metade da pilha assumindo a simetria, encurtando o tempo de medição. Apesar disso, simplesmente por opção, neste trabalho foi medida sempre a totalidade da pilha.

4.2.2 Resultados Obtidos nos Ensaios com Quebra Ventos

Como já se afirmou, anteriormente, os quebra ventos diminuem a velocidade de um escoamento na zona imediata ao seu rasto, pois induzem uma perda de pressão.

Nesta parte serão apresentados e discutidos os resultados das simulações efectuadas com as pilhas protegidas por barreiras artificiais. Utilizou-se uma pilha cónica com 0,11 m de altura e 0,34 m de base, sendo a velocidade utilizada nos ensaios de 8,3m/s.

4.2.2.1 Quebra Vento Sólido, com porosidade $\varepsilon = 0\%$

Nesta parte do trabalho apresenta-se as simulações de barreira sólida (SF). Os ensaios foram realizados com a barreira à distância (DF) de H, 2H, 3H e 4H, medidas desde a base da pilha, sendo H a altura da pilha.

Neste caso observou-se um fenómeno interessante, isto é, quando se simulava o escoamento as partículas de areia deslocavam-se para montante da pilha, acumulando-se atrás da vedação (ver figura 4.7). Este fenómeno é provocado pela recirculação de fluxo

atrás da vedação, o fluxo aerodinâmico ao entrar em contacto com a vedação e deflectido, para cima e para os lados. A zona a jusante de um corpo em torno do qual se desenvolve um escoamento, é denominada de esteira. É a zona do escoamento onde os elementos de fluido com velocidades diferentes entram de novo em contacto. Isto provoca a chamada bolha de recirculação. Esta ocorrência já era esperada, pois a bolha de recirculação que se forma atrás de uma barreira só desaparece quando a porosidade da mesma é superior a 30%, segundo Perera (1981).

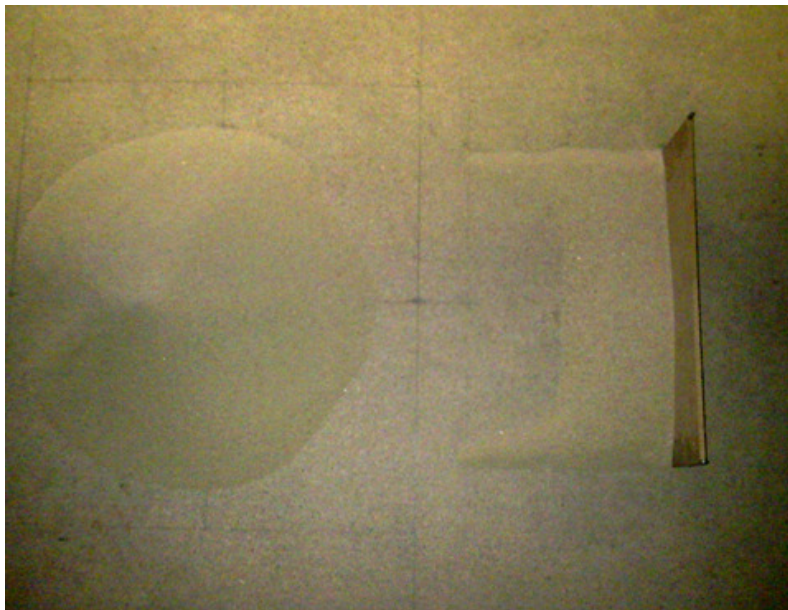


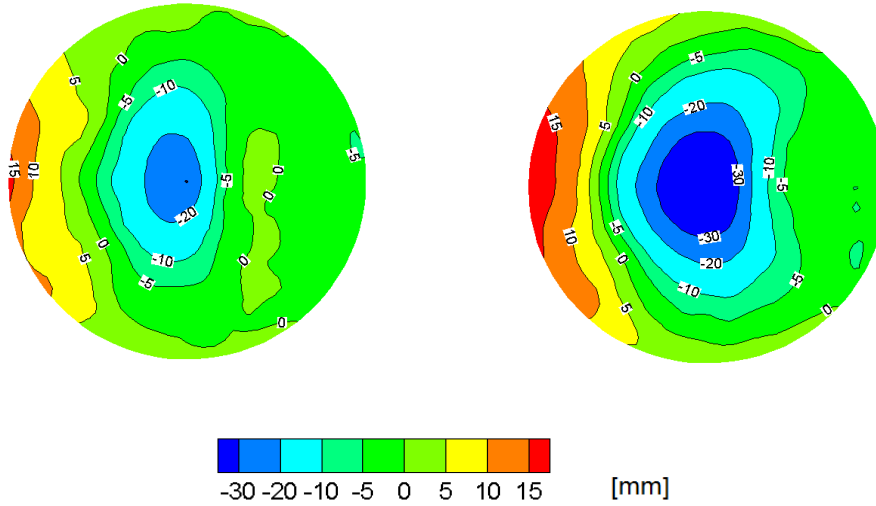
Figura 4.7 – Ilustração da deposição de material atrás da barreira sólida situada à distância $3H$.

Contudo, o que se tentou observar neste caso foi a influência dessa bolha de recirculação na erosão da pilha. Nas distâncias mais próximas à pilha, nomeadamente H e $2H$, verificou-se que a recirculação influencia bastante a deformação da pilha. Na figura 4.6 apresenta-se a deformação da pilha nos ensaios de H a $4H$, com barreira sólida. Ao analisar os gráficos de H e $2H$, repara-se que é na parte montante da pilha, a que se encontra mais perto da vedação, onde se regista a maior acumulação de areia. O mesmo não aconteceu com as simulações para distâncias de $3H$ e $4H$ (figura 4.8), o que dá a entender que, àquelas distâncias, a bolha de recirculação já não afecta tão significativamente a deformação da pilha.

DF: H ; SF; $\gamma = 0^\circ$

t = 5 min

t = 20 min



DF: 2H; SF; $\gamma = 0^\circ$

t = 5min

t = 20 min

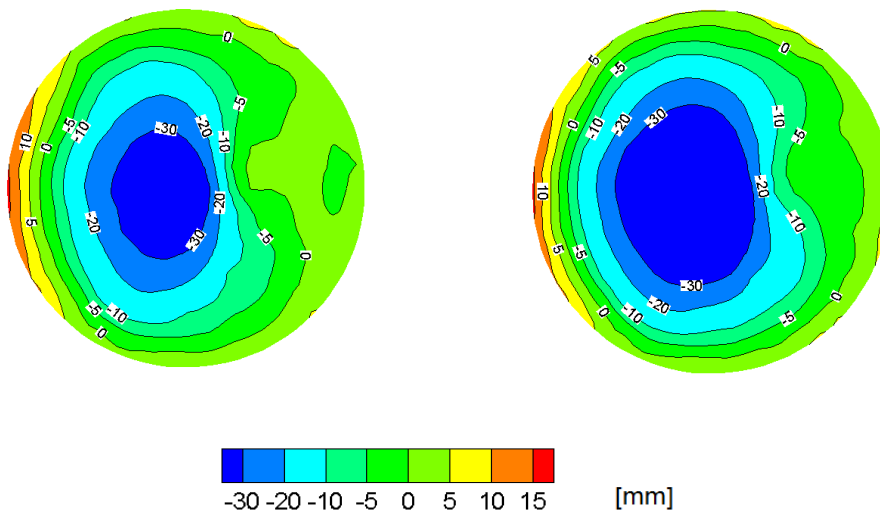
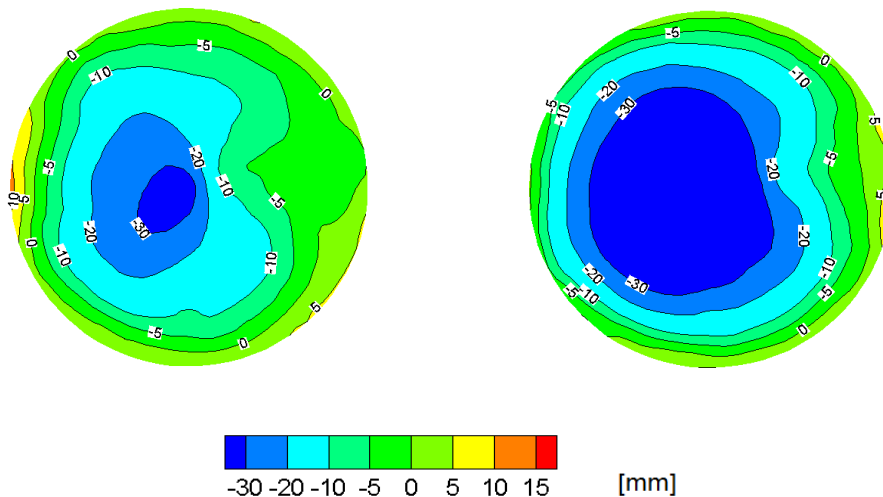


Figura 4.8 – Deformação da pilha, com a protecção sólida (SF) colocada à distância (DF) de H e 2H (aproximação do vento a partir da esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).

DF: 3H; SF; $\gamma = 0^\circ$

t = 5 min

t = 20 min



DF: 4H; SF; $\gamma = 0^\circ$

t = 5 min

t = 20 min

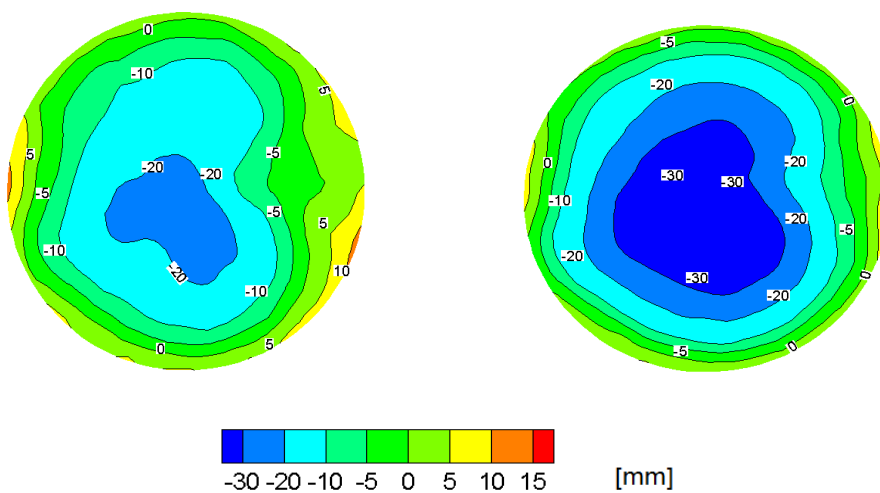


Figura 4.9 – Deformação da pilha, com a protecção sólida (SF) colocada à distância de 3H e 4H (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s)

Analisando a erosão da pilha com as barreiras colocadas às distâncias 3H e 4H, comparando com os ensaios sem barreira às mesmas distâncias, ilustrados na figura 4.8, apresentam uma deformação bastante elevada, registando-se assim como as distâncias mais desfavoráveis à colocação de protecções.

Em relação às outras distâncias simuladas (1H e 2H), a erosão no caso em que a barreira está à distância de 1H foi a menor. Tal constatação está de acordo com o indicado por Stunder e Arya (1988), onde concluíram que a distância 1H era a mais favorável para a colocação da barreira.

4.2.3 Resultados dos ensaios com a barreira colocada em ângulo.

Este caso apresenta a particularidade de as barreiras serem colocadas com o objectivo de simularem a incidência de ventos laterais. Nos trabalhos anteriores, no estudo do efeito de barreiras, considera-se sempre a barreira na posição de maior rendimento, isto é, colocada perpendicularmente em relação ao escoamento. Apenas, Stunder e Arya (1988) estudaram este tema. Portanto existe uma pequena lacuna na abordagem deste tipo de situações. Para colmatar esta lacuna, apresenta-se neste subcapítulo os resultados de alguns ensaios em que se simulou a incidência de ventos laterais nas barreiras (figura 4.10).



4.10 – Representação da pilha protegida com a barreira colocada com um ângulo de 10°.

Para isso, rodou-se a barreira da posição inicial (0°), nos ângulos de 10° , 20° e 40° em relação à direcção do escoamento (ver figura 4.11). Procura-se fazer uma comparação ao estudo realizado por Stunder e Arya.

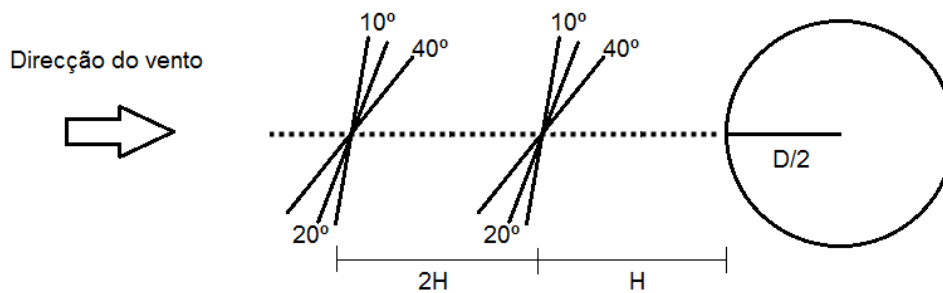


Figura 4.11 – Representação do esquema da colocação das barreiras (ângulo $\gamma = 10^\circ$, 20° e 40°).

4.2.3.1 Barreira de 70% de Porosidade

Para a presente secção, a barreira utilizada apresenta uma porosidade de 70%. Ferreira e Lambert (2009), realizaram um estudo experimental em que utilizaram também uma barreira de 70% de porosidade (F70). Estudando também a erosão, utilizaram a barreira porosa com altura e comprimento igual à altura e diâmetro da pilha, respectivamente. As dimensões da pilha utilizada naquele trabalho são iguais às utilizadas neste estudo.

Como as condições de simulação são iguais às do presente estudo, sendo a única diferença a velocidade do escoamento, apesar disso tentou-se fazer uma comparação em que apenas se realçava a forma como se deformava a pilha. Os resultados obtidos por Ferreira e Lambert (2009) serviram então como base de comparação aos resultados apresentados no caso aqui descrito.

4.2.3.2 Resultados Obtidos nos ensaios com Barreira de 70% de porosidade colocada à distância H, com ângulos de 10°, 20° e 40°

Nas figuras 4.12 e 4.13 apresentam-se as imagens da deformação da pilha, para ângulos de incidência de 10°, 20° e 40°, respectivamente, podendo fazer-se uma comparação como os resultados obtidos por Ferreira e Lambert (2009), cujos resultados são mostrados na figura 4.10.

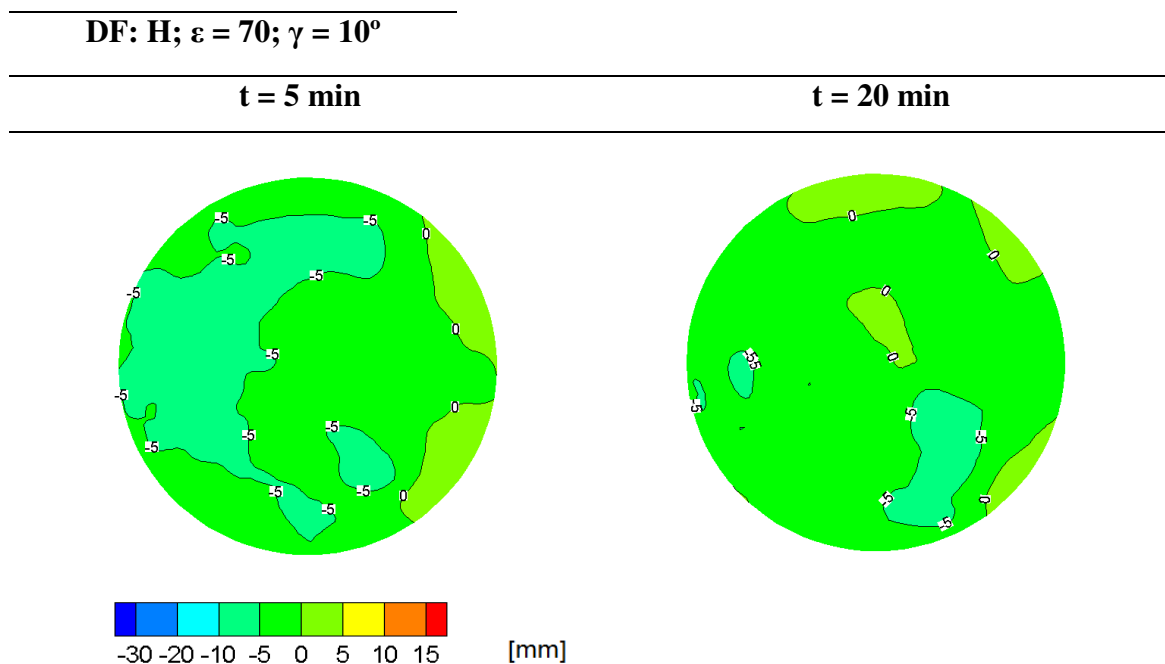
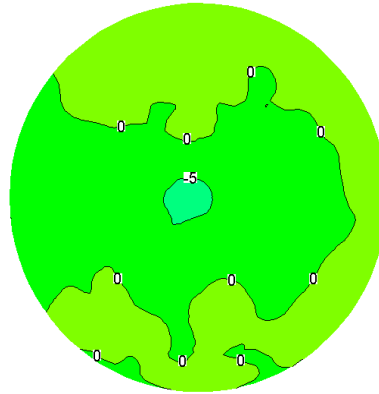
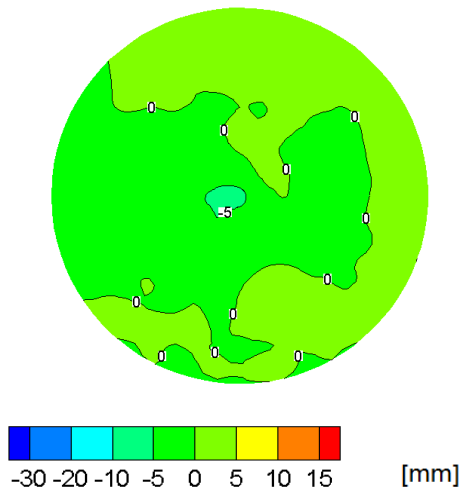


Figura 4.12 – Deformação da pilha protegida com a barreira de $\varepsilon = 70\%$ (F70), à distância H e colocada com um ângulo de $\gamma = 10^\circ$ (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).

DF: H; $\varepsilon = 70$; $\gamma = 20^\circ$

t = 5 min

t = 20 min



DF: H; $\varepsilon = 70$; $\gamma = 40^\circ$

t = 5 min

t = 20 min

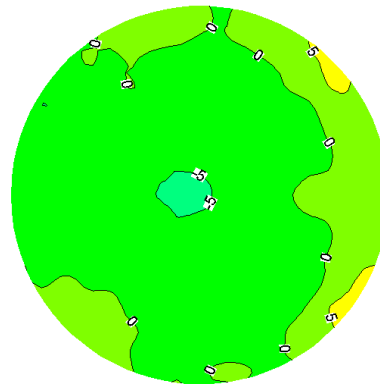
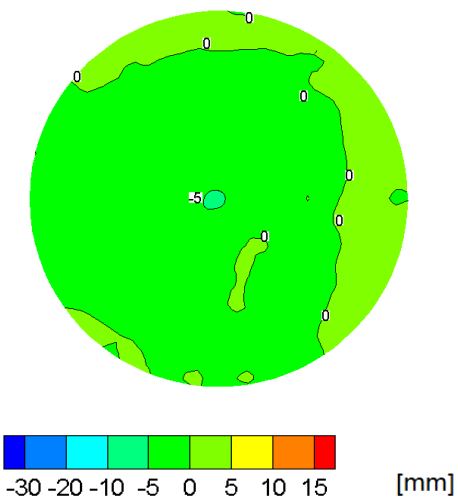


Figura 4.13 – Deformação da pilha protegida com a barreira de $\varepsilon = 70\%$ (F70), à distância H e colocada com um ângulo de $\gamma = 20^\circ$ e 40° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).

As figuras 4.12 e 4.13 mostram a deformação registada na pilha de armazenamento, quando esta estava protegida com vedação porosa F70, colocada com 2 10°, 20° e 40°, respectivamente. Comparando os presentes resultados com os obtidos por Ferreira e Lambert (2009), em que a barreira estava colocada a 0° (figura 4.14). Observa-se que quando a barreira é colocada com ângulo a deformação registada é um pouco maior num dos “lados”, neste caso na parte de cima das figuras, que quando colocada com ângulo 0°. É no ângulo de 40° que se regista a maior deformação da pilha, na zona central existe uma redução de aproximadamente 5 mm de altura, a zona a montante da pilha regista o fenómeno contrário com a deposição de 5 mm de material. Existe também uma modificação na zona de abrigo, registada nos três ângulos de colocação, mas que se torna mais evidente para o ventos incidirem a 40°.

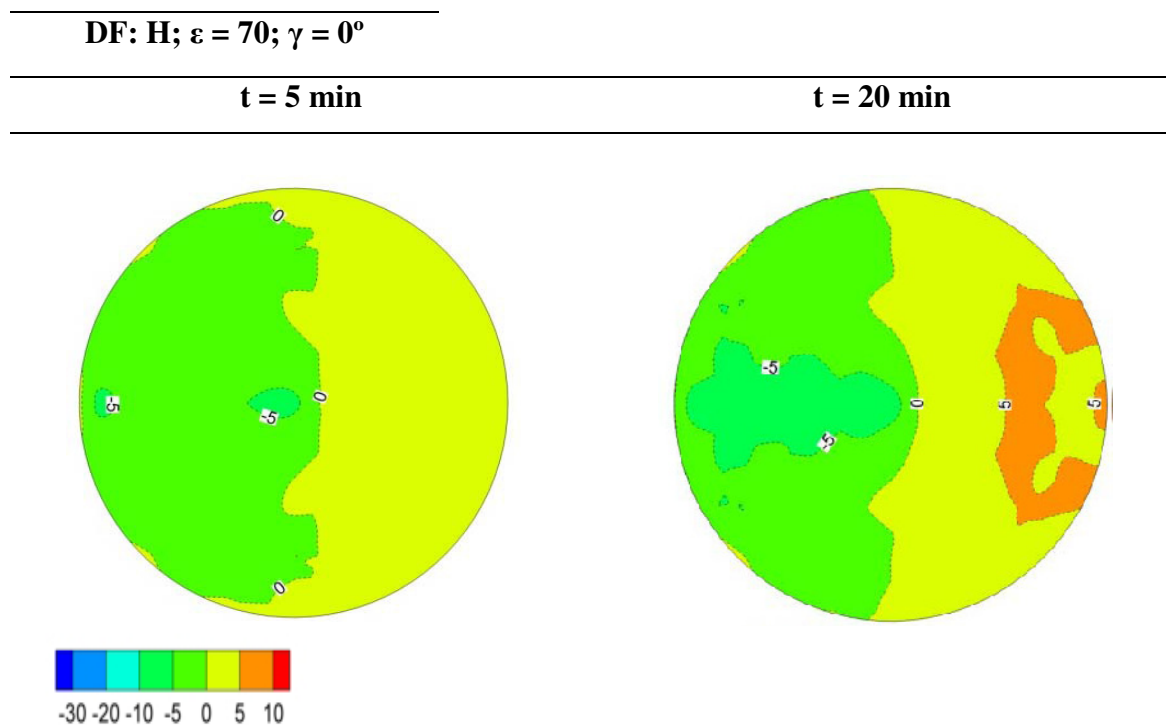


Figura 4.14 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância H, ângulo de 0° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s), adaptado de Ferreira e Lambert (2009).

4.2.3.3 Resultados Obtidos nos Ensaios com Barreira de 70% de porosidade colocada à distância 2H, com ângulos 10°, 20° e 40°

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos para a distância 2H e ângulo de colocação de 10°, 20° e 40°.

DF: 2H; $\varepsilon = 70$; $\gamma = 10^\circ$

t = 5 min

t = 20 min

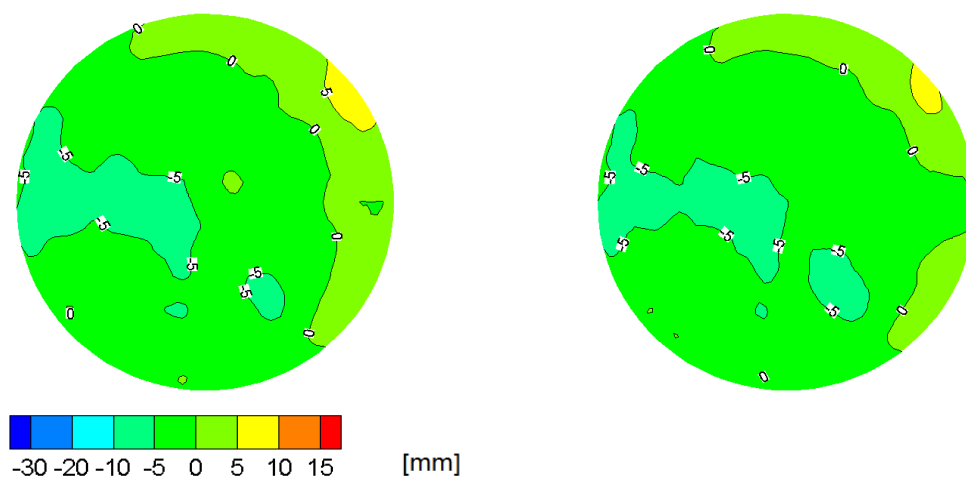


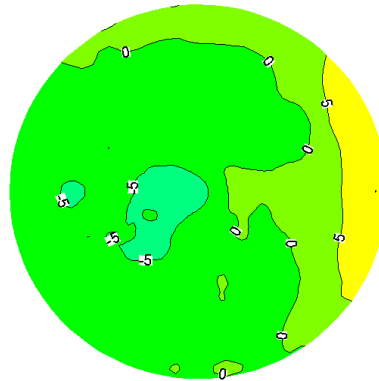
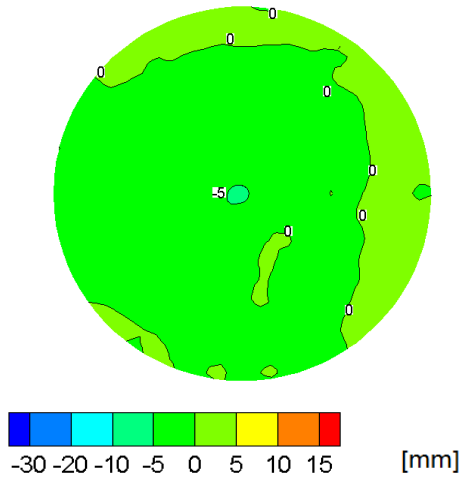
Figura 4.15 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância 2H, ângulo de 10° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).

Este caso é em tudo semelhante ao apresentado no subcapítulo anterior. A deformação apresentada é bastante maior que no caso antecedente, o que já era esperado pois a vedação encontra-se mais afastada da pilha, reduzindo assim o efeito de abrigo. Regista-se também uma mudança da zona de abrigo, com no caso anterior, isto tem origem na incidência do escoamento na barreira.

DF: 2H; $\varepsilon = 70$; $\gamma = 20^\circ$

t = 5 min

t = 20 min



DF: 2H; $\varepsilon = 70$; $\gamma = 40^\circ$

t = 5 min

t = 20 min

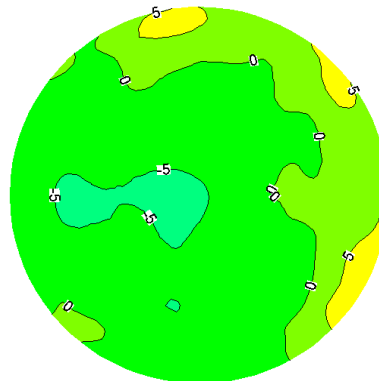
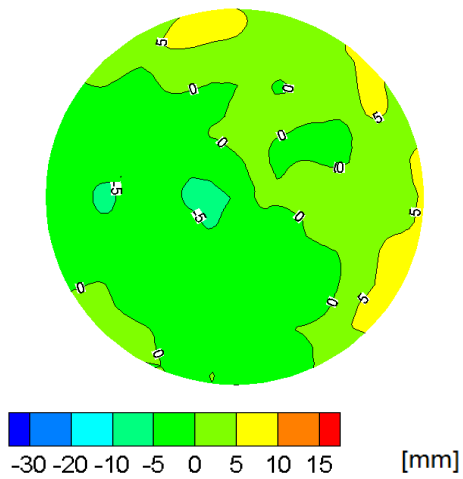


Figura 4.16 – Deformação da pilha protegida com a barreira F70, à distância 2H, colocada com um ângulo de $\gamma = 20^\circ$ e 40° (aproximação do vento pela esquerda; $U_0 = 6,8$ m/s).

CAPÍTULO CINCO

5 Conclusões

Após terem sido apresentados e discutidos os resultados obtidos, importa agora realçar os principais aspectos deste estudo e as conclusões alcançadas.

Apresentam-se em seguida, de forma sistemática, as principais conclusões retiradas do estudo efectuado.

Este trabalho incidiu sobre a simulação experimental e a avaliação das características da erosão por acção do vento em pilhas de armazenamento. Apresenta-se, como uma continuação do estudo realizado por Ferreira e Lambert (2009). No capítulo um delinearam-se como principais objectivos, o teste do equipamento de medida utilizado na simulação experimental e avaliar a deformação da pilha provocada pela acção do escoamento. Os experimentos realizaram-se de forma sistemáticas de forma a fornecer resultados comparáveis e fidedignos.

Foram efectuados testes de repetibilidade do sensor, e a forma de construção da pilha. Simulou-se a erosão eólica da pilha sem protecção e ainda foram testados dois tipos de vedações, uma sólida, com 0% de porosidade, e uma porosa com porosidade 70%, em que nesta última se simulou a incidência de ventos laterais.

A revisão bibliográfica realizada, dirigiu-se concretamente ao tema em estudo, permitiu identificar os vários tipos de abordagens ao problema, bem como a escassez de estudos de alguns parâmetros. Verifica-se uma grande evolução na abordagem deste problema com a utilização de ferramentas computacionais, no entanto para que este tipo de abordagem apresente resultados viáveis, o modelo simulado terá que ser réplica exacta do real. Para isso necessitam de estudos experimentais, como o aqui exposto, de forma a melhorarem. Espera-se que este estudo sirva como plataforma de comparação dos resultados obtidos computacionalmente.

Na análise do sensor, constatou-se que o mesmo apresenta uma precisão de medição excelente e ainda uma repetibilidade muito boa. No teste de repetibilidade da construção da pilha, reconheceu-se que existe dificuldade em construir duas pilhas exactamente iguais, mas os valores das diferenças obtidos podem considerar-se desprezáveis, podendo admitir-se que a repetição de construção/reconstrução da pilha é perfeitamente aceitável.

O primeiro teste de erosão efectuou-se para a pilha sem protecção, tendo-se observado grandes valores de deformação. Nesta parte do trabalho analisou-se a simetria da deformação, e os resultados obtidos foram de uma maneira geral, aceitáveis comprovando-se assim a similaridade da deformação. O mesmo não se pode afirmar dos testes em que a barreira foi colocada em vários ângulos em relação ao escoamento, simulando-se assim ventos com incidência lateral.

Em relação aos testes efectuados à barreira sólida, às distâncias H, 2H, 3H e 4H, apurou-se que as pilhas em que as barreiras foram colocadas às distâncias 3H e 4H, apresentam as maiores deformações, mas constatou-se que a bolha de recirculação que se forma atrás da barreira interfere pouco na erosão da pilha. As pilhas em que as barreiras foram colocadas a H e 2H, registaram as menores deformações, mas ao contrário das distâncias 3H e 4H, a recirculação de ar atrás da barreira influencia bastante a deformação da pilha, existindo grande acumulação de areia atrás da barreira.

No estudo da barreira com porosidade $\varepsilon = 70\%$, realizaram ensaios em que a barreira se colocou a 10° , 20° , 40° , em relação à direcção do escoamento. Verificou-se que a incidência de ventos laterais na barreira protectora tem influência na forma como a pilha se deforma. Como o escoamento incide lateralmente na pilha, a zona de abrigo formada pela barreira é alterada, originando assim mudança na forma como a pilha se deforma. A maior deformação registou-se na pilha com a barreira colocada a 40° , enquanto a barreira colocada a 10° induziu a menor deformação. Com isto conclui-se que a erosão da pilha aumenta com o aumento do ângulo de incidência do escoamento. Também se aferiu, neste caso, que a distância a que a barreira é colocada influencia a erosão, na medida em que aumentando a distância também aumenta a erosão da pilha.

Bibliografia

Anderson, R. S. (1988). Saltation and suspension of snow by wind: A general Theory. *Annals of Glaciology* , 294.

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/chieff/ap42/ch13/final/c13s0205.pdf>.

Ferreira, A., & Lambert, R. (2009). *Computacional and experimental study on the use of fences to control the wind erosion of a conical stockpile*. Departement of Mechanical Engineering - University of Coimbra.

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.

Gonçalves, E. d. (2008). *Desenvolvimento de uma aplicação para controlo de mecanismo de atravessamento e medição de distâncias com equipamento laser*. Departamento de Engenharia Mecânica - FCTUC.

Judd, M., Raupach, M., & Finnigan, J. (1996). A wind tunnel study of turbulent flow around a single and multiple windbreaks, part I: Velocity fields. *Boundary-Layer Meteorology* , 80, 127-165.

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. (1998). Surface-pressure variations on a triangular prism by porous fences in a simulated atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* , 73, 45-58.

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.

Lee, S., Park, K., & Park, C. (2002). Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements. *Atmospheric Environment* , 36, 1453-1463.

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.

Richard, P. (2005). Slow relaxation and compactation of granular systems. *Nature Materials* , 4, 121-128.

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* .

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.