

• U



C •

Departamento de Engenharia Mecânica

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

# **ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS, A PARTIR DE PILHAS DE ARMAZENAMENTO, DEVIDO À ACÇÃO DO VENTO**

**Maria José Oliveira Salgueiro**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em:

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**Júri:**

**Presidente: Prof. Luís Adriano Alves de Sousa Oliveira**

**Orientador: Prof. Almerindo Domingues Ferreira**

**Vogal: Prof. António Manuel Gameiro Lopes**

**Setembro de 2008**

## Índice

1 – Introdução.....	7
2 – Modelo matemático.....	9
2.1 – Equações básicas de transporte.....	9
2.2 – Modelos de turbulência.....	12
2.2.1 – Modelo de turbulência k- $\epsilon$ .....	12
2.2.2 – Modelo de turbulência k-w Shear Stress Transport.....	12
2.3 – Potencial de erosão.....	13
3 – Apresentação e discussão de resultados.....	21
3.1 – Pilha cónica.....	21
3.1.1 – Malha.....	21
3.1.2 – Condições de fronteira.....	24
3.1.2.1 – Entrada e saída.....	24
3.1.2.2 – Paredes laterais e topo.....	24
3.1.2.3 – Pilha e base.....	24
3.1.3 – Resultados para a pilha cónica.....	25
3.2 – Dunas triangulares.....	27
4 – Parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego.....	32
4.1 – Apresentação de resultados.....	32
4.1.1 – Malha.....	33
4.1.2 – Condições de fronteira.....	35
4.1.2.1 – Entrada e saída.....	35
4.1.2.2 – Paredes laterais e topo.....	35
4.1.2.3 – Pilha e base.....	35
5 – Conclusões.....	39
<b>Bibliografia.....</b>	<b>41</b>

## **Abstracto**

Na indústria a prática mais comum para o armazenamento de grandes quantidades de material é o desenvolvimento de parques em áreas abertas. São assim geradas poeiras e um expressivo problema ambiental, económico e operacional.

A presente dissertação teve dois objectivos distintos. O primeiro foi obter resultados numéricos com base no software CFD (computational fluid dynamics) Ansys CFX 11 com o propósito de avaliar a tensão superficial em pilhas e dunas, perceber os mecanismos de transporte de sedimentos, estudar as principais variáveis que têm que ser consideradas e comparar com outros resultados numéricos e experimentais já publicados (*Walker e Nickling, 2003; Badr e Harion, 2005*). Para atingir o segundo objectivo e utilizando o mesmo software de simulação numérica, estudou-se, de uma forma um pouco superficial, o caso do parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego, de modo a obter resultados relativos ao potencial de erosão das pilhas de carvão.

Verificou-se que a variação da velocidade do vento sobre as pilhas de armazenamento é bastante significativa quando se pretende avaliar o transporte de sedimentos.

As simulações apresentadas neste trabalho, para avaliação do potencial de erosão nas pilhas do parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego, podem ser bases úteis para um futuro e mais detalhado trabalho numérico e experimental.

*Palavras-chave:* Emissões de poeiras; Erosão pelo vento; Pilhas de carvão; Simulação numérica de escoamentos (CFD); Tensão superficial; Transporte de sedimentos.

## Abstract

In industry it's common practice to store stockpiles of materials in growing open areas. Therefore dust particles become an expressing ambient, economic and operational problem.

The present dissertation had two distinct objectives. The first was to obtain numerical results based on the commercial software, CFD (computational fluid dynamics) Ansys CFX 11, which had the purpose to evaluate shear stress in stockpiles and dunes, understand the mechanisms of sediment transport, study the main variables that have to be considered and compared with other numerical and experimental results already published (*Walker e Nickling, 2003; Badr e Harion, 2005*). To reach the second goal and to obtain results of erosion potential of coal stockpiles using the same numerical simulation software, I studied, superficially, the Pego thermoelectric central case.

The results showed that the wind velocity variations over the stockpiles it's one of the most important mechanisms when trying to evaluate sediment transport.

The simulations presented in this work to assess the erosion potential in coal stockpiles on the Central *Termoelétrica do Pego*, may be a useful basis for a future and more detailed numerical and experimental work.

*Keywords:* Particle emission; Wind erosion; Coal stockpiles; Numerical simulation of wind flow; Shear stress; Sediment transport.

## Nomenclatura

$B_i$ – Taxa de geração/eliminação de quantidade de movimento na direcção cartesiana $i$	[N/m <sup>3</sup> ]
$D$ – Difusibilidade mássica	[Kg/m <sup>2</sup> s]
$g_i$ – Aceleração da gravidade segundo a direcção cartesiana $i$	[m/s <sup>2</sup> ]
$k$ – Energia cinética da turbulência	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$m$ – Fracção mássica	
$N$ – Número de perturbações por ano	
$p$ – Pressão termodinâmica	[N/m <sup>2</sup> ]
$P_i$ – Potencial de erosão	[g/m <sup>2</sup> ]
$S$ – Taxa volumétrica de geração/eliminação provocada por reacções químicas	[Kg/m <sup>3</sup> s]
$S_n$ – Taxa volumétrica de geração/eliminação de calor	[W/m <sup>3</sup> ]
$S_{ij}$ – Componente cartesiana do tensor da taxa de deformação	[s <sup>-1</sup> ]
$\vec{u}$ – Vector velocidade	[m/s]
$u$ – Velocidade do vento	[m/s]
$u_i$ – Componente cartesiana $i$ do vector velocidade	[m/s]
$u_j$ – Componente cartesiana $j$ do vector velocidade	[m/s]
$u_s$ – Velocidade superficial do vento	[m/s]
$u_s^+$ - Distribuição da velocidade superficial do vento	[m/s]
$u_t^+$ - Velocidade crítica para que ocorra fricção	[m/s]
$u^*$ - Velocidade de atrito ou fricção	[m/s]
$u^+$ - Velocidade da “milha de vento mais rápida”	[m/s]
$u_{10}^+$ - Velocidade da “milha de vento mais rápida” por um anemómetro de referência	[m/s]
$U_0$ – Velocidade máxima no perfil de velocidade	[m/s]
$V_i$ – Taxa de geração/eliminação de quantidade de movimento devido a forças viscosas	[N/m <sup>3</sup> ]
$z$ – Altura sobre a superfície	[m]
$z_0$ – Altura da rugosidade	[m]
$\epsilon$ – Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\alpha$ – Expoente da lei de potência	

$\delta$  – Espessura da camada limite

$\delta_{ij}$  – Delta de Kronecker

$\rho$  – Massa específica [Kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  - Viscosidade dinâmica [Ns/m<sup>2</sup>]

$\zeta_w$  – Tensão superficial [N/m<sup>2</sup>]

## 1 – Introdução

O estudo da quantidade de poeiras geradas por pilhas criadas para armazenamento de grandes quantidades de material maciço agregado, tais como o carvão, tem sido alvo de investigação por parte de vários autores. A prática mais comum é desenvolver estes parques em áreas abertas e assim, a geração de poeiras, é considerada um significativo problema ambiental e operacional. Este fenómeno gera um estudo altamente complexo devido ao grande número de variáveis que têm que ser consideradas. Deste modo, vários factores devem ser tidos em conta, tais como as características do vento, as elevações das superfícies expostas ao vento, os parâmetros das partículas, as alterações das superfícies, a geometria das pilhas, etc. Mas as mais salientes são a energia do vento e as partículas erodíveis disponíveis. A previsão do comportamento do vento sobre as pilhas de armazenamento tem um papel preponderante na avaliação do potencial de erosão e do impacto ambiental.

O transporte pelo vento de partículas envolve a sua elevação da superfície da pilha, dispersão atmosférica e nova deposição na mesma ou noutras superfícies. Os efeitos deste processo são significativos devido a uma extensa gama de razões para as emissões de poeiras a nível geral, principalmente devido ao seu impacto ambiental incluindo a perda de matérias-primas e energia, a qualidade do ar e os riscos para a saúde. A nível económico também são gerados alguns problemas, principalmente para as indústrias. Todos estes motivos incentivam o estudo do arrastamento de poeiras particularmente em parques industriais.

As fontes de emissões de poeiras, como as pilhas de armazenamento, são contributos significativos para os níveis totais de partículas suspensas. Podem apontar-se vários exemplos de estudos feitos com o objectivo de limitar as emissões de poeiras. Estes, estão principalmente focados na protecção exercida por barreiras porosas e quebra ventos (*Borges e Viegas, 1988; Stunder e Arya, 1988; Lee e Kim, 1999; Lee et al., 2002*), que se tornaram uma das soluções comuns para a protecção de parques de carvão. Contudo, com o comportamento aleatório do vento e parques com grandes extensões a serem protegidos, esta técnica pode originar resultados menos satisfatórios, em particular no que diz respeito ao custo. Uma aproximação simples e económica para a redução de emissão de poeiras é encontrar o melhor compromisso entre a localização e a configuração das pilhas, de acordo com as características dominantes do vento no lugar de implementação dos parques.

A presente dissertação tem dois objectivos distintos. Para o primeiro, com base no software CFD (computational fluid dynamics) Ansys CFX 11, realizou-se um estudo de comparação/validação de resultados com dois diferentes resultados já publicados (*Walker e Nickling, 2003; Badr e Harion, 2005*). Assim, comparam-se valores da tensão superficial para o caso de uma pilha em forma de cone e ainda para dunas isoladas e dunas pouco espaçadas. Para atingir o segundo objectivo, e recorrendo ao mesmo software de simulação numérica, estudou-se o caso do parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego, de modo a obter resultados relativos ao potencial de erosão das pilhas de carvão.

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. Após o 1º capítulo que introduz e, simultaneamente, fornece uma visão geral do trabalho desenvolvido, descrevem-se, no 2º capítulo algumas noções básicas do modelo matemático que lhe está subjacente e a sua fundamentação teórica. No capítulo 3 são apresentados os resultados dos casos seleccionados para comparação e validação. O 4º capítulo é responsável pela apresentação e discussão dos principais resultados obtidos no estudo em que se considera a Central Termoeléctrica do Pego. Finalmente no 5º capítulo são apresentadas as principais conclusões e algumas propostas para trabalhos futuros que poderão complementar a presente dissertação.

## 2 – Modelo matemático

### 2.1 Equações básicas de transporte

No presente capítulo far-se-á a apresentação dos vários fenómenos de transferência que ocorrem no escoamento em estudo através de equações diferenciais. As mesmas expressam a conservação das diversas propriedades (massa e quantidade de movimento) num volume de fluido infinitesimal. Pode-se mostrar que qualquer uma destas equações é susceptível de ser escrita numa forma geral envolvendo quatro termos: termo transitório (taxa de variação local da propriedade), termo de transporte advectivo, termo de transporte difusivo e termo-fonte, que é a taxa de geração/eliminação da propriedade em estudo. Em termos matemáticos, estas leis de conservação podem ser expressas da seguinte forma (*Patankar, 1980*):

- Conservação de uma propriedade específica (conservação de massa):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \text{div}(\rho \vec{u} m) = \text{div}(\rho D \text{grad } m) + \sum \dot{S} \quad (2.1)$$

onde  $\rho$ ,  $D$  e  $m$  são os valores locais e instantâneos da propriedade específica da mistura em escoamento, da difusibilidade mássica e da fracção mássica da propriedade. O termo  $S$  quantifica a taxa de geração/eliminação da propriedade, provocada por fontes/poços, que se anula na ausência deles. A avaliação do fluxo difusivo faz-se com recurso à Lei de Fick da difusão, que relaciona a densidade de fluxo da propriedade com o gradiente da sua fracção mássica (*Bird et al., 1960; Bennet e Myers, 1982*). Dadas as simplificações assumidas, no presente trabalho, esta equação não é considerada.

A equação da conservação de massa, quando aplicada à totalidade do fluido contido na unidade de volume, ou seja, para  $m=1$ , toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

- Conservação de Quantidade de Movimento:

Aplicando a 2ª Lei de Newton ao fluido que atravessa um volume de controlo infinitesimal, numa determinada direcção, obtém-se:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)}_1 + \underbrace{\text{div}(\rho \vec{u} u_i)}_2 = \underbrace{\text{div}(\mu \text{grad} u_i)}_3 - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_4 + \underbrace{B_i}_6 + \underbrace{V_i}_7 \quad (2.3)$$

onde  $\rho$  tem o significado atribuído na equação 2.1 e  $u_i$ ,  $\mu$  e  $p$  são os valores locais e instantâneos da velocidade, da viscosidade e da pressão. Os termos  $B_i$  e  $V_i$  caracterizam as taxas de geração/eliminação da quantidade de movimento na direcção  $i$ .

As equações 2.1 e 2.3 remetem-se à unidade de volume do fluido e os seus termos, que traduzem as diferentes influências sobre cada uma das propriedades têm os seguintes significados:

- 1 – Taxa de variação local.
- 2 – Transporte advectivo.
- 3 – Transporte difusivo.
- 4 – Taxa de geração/eliminação de espécie química.
- 5 – Força de pressão.
- 6 – Força volúmica na direcção  $i$ .
- 7 – Forças de natureza viscosa na direcção  $i$  não incluídas no correspondente termo difusivo.

A especificação dos termos de geração/eliminação das propriedades pode ser feita expressando-se nas equações de conservação em notação tensorial cartesiana (*Schlichting, 1987*):

- Conservação de massa (equação da continuidade):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2.4)$$

- Conservação de uma espécie química:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial m}{\partial x_j} \right) \quad (2.5)$$

- Conservação de quantidade de movimento (direcção  $i$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ 2\mu \left( S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2.6)$$

em que  $\rho g_i$  representa a força gravítica e o tensor das tensões viscosas entre parêntesis rectos. O tensor  $S_{ij}$  caracteriza a taxa de deformação e é definido por:

$$S_{ij} = \frac{\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}{2} \quad (2.7)$$

E  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker, tal que  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases}$

Ainda podem ser feitas várias simplificações, considerando um fluido incompressível e *newtoniano*, e assumir-se que existem apenas pequenas diferenças de temperatura.

Nestas condições adopta-se a *aproximação de Boussinesq* (Boussinesq, 1903; Gray e Georgini, 1976; Nogotov, 1978).

As equações de Navier-Stokes descrevem escoamentos laminares e escoamentos turbulentos. Contudo, escoamentos turbulentos com valores realísticos de Reynolds abrangem um grande número de escalas espaciais de turbulência, assim como escalas temporais. Estes, geralmente envolvem escalas de comprimento muito mais pequenas do que a do menor elemento finito da malha, podendo assim ser usado na análise numérica. A simulação numérica directa (DNS) destes escoamentos requer uma capacidade computacional que é muito superior à disponível para situações complexas, pois todas as escalas de turbulência são resolvidas. Para prever os efeitos da turbulência, a maior parte dos estudos que usam software CFD recorrem ao uso de modelos de turbulência. Estes modelos foram especificamente desenvolvidos para modelar os efeitos da turbulência, sem o recurso a malhas de refinamento proibitivo e à simulação numérica directa.

Vários métodos de resolução podem ser usados, estando boa parte deles disponíveis no CFX, desde os simples “modelos com zero equações” ao complexo desenvolvimento LES (Large Eddy Simulation).

O método RANS (baseado em valores médios de Reynolds Navier-Stokes) mostra um bom compromisso entre precisão e esforço de cálculo, sendo vastamente usado em grande parte das aplicações de engenharia.

Modelos de turbulência de média complexidade foram seleccionados, no presente trabalho, de maneira a obter tempos de resolução aceitáveis em máquinas de apenas um processador. Os modelos adoptados são:  $k-\varepsilon$  (com e sem a consideração de rugosidade superficial) e  $k-w$  baseados no SST (shear stress transport), combinados com vários perfis logarítmicos e semi-logarítmicos de vento.

## **2.2 Modelos de turbulência**

### **2.2.1 Modelo de turbulência $k-\varepsilon$ :**

O modelo  $k-\varepsilon$  é dos modelos de turbulência de utilização mais comum, utilizando duas equações, isto é, inclui duas equações extra para representar as propriedades turbulentas do escoamento. Este facto permite que este modelo entre em consideração com eventos passados, como convecção e difusão de energia turbulenta. A variável  $k$  é uma variável de transporte que quantifica a energia cinética turbulenta. A segunda variável de transporte quantifica a dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ). O uso de gradientes de segunda ordem nas equações de escoamento intermédio e a utilização da viscosidade turbulenta isotrópica promovem estabilidade numérica e facilidade de cálculo. A desvantagem destas bases é que solicitações em modelos 3D são assumidas como iguais. Contudo, da análise de outros casos de estudo, verificou-se que com o refinamento da malha este efeito acaba por ser contabilizado. Isto porque, cada elemento da malha, na proximidade de um acidente geométrico, vai quantificar uma nova zona de turbulência. Desta forma, o modelo adapta-se e caracteriza de modo “artificial” a geometria em causa.

### **2.2.2 Modelo de turbulência $k-w$ Shear-Stress-Transport:**

O modelo de turbulência  $k-w$  SST é um sistema de duas equações que quantifica as correntes viscosas e que tem sido bastante utilizado. O uso da formulação  $k-w$ , na superfície interna da fronteira, torna o modelo aplicável directamente até à parede através da subcamada viscosa. O modelo  $k-w$  SST pode ser usado como um modelo de turbulência para baixo número de Reynolds, sem a necessidade de usar nenhuma outra função de amortecimento. Uma grande desvantagem deste modelo é que necessita de calcular a distância à parede. Este facto não é muito prejudicial quando se utiliza para cálculos estáticos, caso contrário a simulação será problemática e dispendiosa. A formulação SST muda para um comportamento

k- $\epsilon$  quando existe escoamento livre e assim evita o problema mais comum da formulação k-w, a sensibilidade à turbulência num escoamento livre na entrada. Autores que usaram este modelo várias vezes, referem o seu bom comportamento em aplicações com gradientes de pressão adversos e descolamento. O modelo k-w SST produz um grande nível de turbulência em regiões de tensões com amplitudes normais, como regiões de estagnação e com forte aceleração. Esta tendência é menos pronunciada no modelo k- $\epsilon$ .

## 2.3 Potencial de erosão

A formação, pelo vento, de poeiras tem que ser considerado como sendo um problema ambiental significativo. Existem vários factores que influenciam a quantidade de poeiras geradas e entre eles estão:

- Características do vento (direcção, velocidade, turbulência, etc.);
- Exposição ao vento;
- Elevação da superfície exposta;
- Parâmetros das partículas (massa específica, forma, diâmetro, etc.);
- Presença de elementos não erodíveis e formação de crostas;
- Perturbação da superfície.

As emissões de tais poeiras podem ser geradas pela erosão, provocada pelo vento, de pilhas de armazenamento situadas em áreas expostas dentro de unidades industriais. Estas fontes são caracterizadas por superfícies constituídas por partículas, com um diâmetro aproximadamente maior do que 1 [cm], denominadas elementos não erodíveis. Este material agregado nas superfícies das pilhas é caracterizado pela disponibilidade finita de material que pode sofrer erosão eólica, referida como sendo o seu potencial de erosão. Este potencial é reduzido através de qualquer formação natural de camada/crosta que liga o material. Terrenos soltos ou outro tipo de materiais agregados, constituídos por partículas do tamanho de grãos de areia, funcionam como reservatórios ilimitados de material erodível e podem libertar enormes quantidades de partículas durante horas, sem redução substancial da taxa de emissões, como é o caso de dunas ou pilhas de areia.

A velocidade do vento não é, habitualmente, suficiente para suportar a erosão pelo vento das superfícies aplanadas. Contudo, as rajadas de vento podem esgotar rapidamente uma parte substancial do potencial de erosão. Como este potencial aumenta rapidamente com a velocidade do vento, as emissões estimadas devem ser descritas para as rajadas com maior magnitude.

As emissões para as actividades com pilhas de armazenamento podem ser estimadas usando a informação da secção 13.2.5 *Industrial Wind Erosion do U.S. EPA AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, seguindo-se a descrição de toda a metodologia.

A variável usada que melhor reflecte a magnitude das rajadas de vento é conhecida pela “milha mais rápida”, segundo a secção 13.2.5 *Industrial Wind Erosion do U.S. EPA AP-42*. Esta quantidade representa a velocidade do vento em milhas por hora que passou no anemómetro no menor intervalo de tempo possível. Medições diárias da “milha mais rápida” são demonstradas mensalmente na estação meteorológica. A duração da “milha mais rápida”, que tipicamente demora 2 minutos (com a velocidade da milha mais rápida a rondar os 48km/h), enquadra-se bem na meia-vida do processo de erosão, que normalmente se situa entre 1 e 4 minutos. Repare-se que as rajadas de vento mais fortes excedem significativamente a milha mais rápida diária.

O perfil da velocidade do vento, na camada limite da superfície, é encontrado com base na distribuição logarítmica:

$$u(z) = \frac{u^*}{0.4} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.8)$$

em que  $u(z)$  é a velocidade do vento [cm/s],  $u^*$  é a velocidade de atrito [cm/s],  $z$  é a altura sobre a superfície [cm],  $z_0$  é a altura da rugosidade [cm] e  $0.4$  a constante de Von Karman's.

A velocidade de atrito, ou fricção,  $u^*$  é a grandeza que se relaciona com as tensões originadas pelo vento, na superfície erodível, sendo determinada a partir do declive do perfil logarítmico da velocidade. A rugosidade  $z_0$  é a dimensão da rugosidade da superfície exposta e determina-se com base na altura a que a velocidade do vento é zero (ponto de intersecção do perfil de velocidade com o eixo do  $y$ ).

As emissões, geradas pela erosão, também dependem da frequência de perturbação da superfície erodível, porque cada vez que a superfície é perturbada o seu potencial de erosão é renovado. Uma perturbação é definida como uma acção, que resulta da exposição de material “novo” na superfície. Numa pilha de armazenamento isto pode acontecer quando é adicionado ou removido material da superfície.

O factor de emissão para misturas de material superficial erodível e não erodível sujeitas a perturbação, pode ser expresso em  $[g/m^2]$  por ano, da seguinte forma:

$$\text{Factor de Emissão} = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (2.9)$$

onde  $k$  é o multiplicador relacionado com o tamanho da partícula,  $N$  é o número de perturbações por ano e  $P_i$  é o potencial de erosão, correspondente à velocidade do vento mais elevada durante o período entre perturbações  $[g/m^2]$ .

O multiplicador de tamanho  $k$  varia com o tamanho aerodinâmico da partícula. Para uma superfície perturbada diariamente  $N$  assume o valor de 365 por ano, para uma superfície que é perturbada todos os 6 meses  $N=2$  por ano.

No cálculo do factor de emissão, cada área da superfície erodível que está sujeita a uma frequência de perturbação diferente, deve ser tratada separadamente. O potencial de erosão para uma superfície exposta e seca é dado pela função:

$$P = 58(u^* - u_i^*)^2 + 25(u^* - u_i^*) \quad (2.10)$$

$$P = 0 \text{ para } u^* \leq u_i^* \quad (2.11)$$

em que  $u^*$  continua a ser a velocidade de fricção [m/s] e  $u_i^*$  é a velocidade mínima, ou crítica, para que ocorra fricção [m/s].

O resultado do cálculo é válido somente para um período de tempo mais longo do que o período entre perturbações.

Para superfícies incrustadas, a velocidade inicial de fricção é melhor estimada através da estrutura seca agregada do solo. Um simples peneiro manual pode ser usado para testar a superfície do solo e determinar a distribuição de tamanho da superfície agregada, através da quantidade de solo retida no peneiro, seguindo o procedimento publicado por W. S. Chepils em 1952, referido na secção 13.2.5 *Industrial Wind Erosion do U.S. EPA AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, com base em estudos laboratoriais, e descrito de seguida.

### **Procedimento de campo para determinar a velocidade inicial de fricção**

Passo 1. Preparar um conjunto de peneiros com as seguintes dimensões de rede: 4mm, 2mm, 1mm, 0.5mm e 0.25mm. Colocar um recipiente por baixo do peneiro mais fino (0.25mm).

Passo 2. Recolher uma amostra da superfície do solo de partículas soltas (aproximadamente 1cm de profundidade, para superfícies incrustadas), removendo as pedras que tenham mais que 1cm de diâmetro. A área amostrada não deve ter mais de 30cm por 30cm.

Passo 3. Despejar a amostra no peneiro maior (4mm), e colocar-lhe uma tampa.

Passo 4. Mover o peneiro manualmente, usando um movimento circular no plano horizontal. Completar este movimento circular 20 vezes a uma velocidade que permita algum movimento horizontal relativo entre o peneiro e as partículas.

Passo 5. Inspeccionar as quantidades relativas que ficaram em cada peneiro, e determinar em que distribuição de tamanho o agregado se encontra, isto é, comparando a quantidade de partículas que ficaram no peneiro maior com o seguinte peneiro de dimensão menor.

Passo 6. Determinar o início da velocidade de fricção através da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Resultados após aplicação dos peneiros.

Peneiro Tyler num.	Abertura (mm)	Ponto médio (mm)	$u_t^*$ [m/s]
5	4	-	-
9	2	3	100
16	1	1.5	76
32	0.5	0.75	58
60	0.25	0.375	43

A velocidade crítica de fricção para variados tipos de superfícies foi determinada através de medidas experimentais num túnel de vento. Os resultados são apresentados a seguir:

Tabela 2.2 Velocidades críticas de fricção.

Material	Velocidade crítica de fricção (m/s)	Altura da rugosidade (cm)	Velocidade inicial do vento a 10m (m/s)	
			$z_0 = \text{actual}$	$z_0 = 0.5 \text{ cm}$
Sobrecarrego <sup>a</sup>	1.02	0.3	21	19
Escória (material proveniente da estrada) <sup>a</sup>	1.33	0.3	27	25
Carvão no chão (que rodeia a pilha) <sup>a</sup>	0.55	0.01	16	10
Pilha de carvão desincrustada	1.12	0.3	23	21
Trilhos do raspador na pilha de carvão <sup>a, b</sup>	0.62	0.06	15	12
Pó de carvão fino sobre o cimento <sup>c</sup>	0.54	0.2	11	10

<sup>a</sup> mina de superfície do lado oeste.

<sup>b</sup> ligeiramente incrustado.

<sup>c</sup> estação de energia do lado este.

A “milha mais rápida” de vento pode ser obtida, mensalmente, na estação meteorológica que analise o local de estudo em questão. Estes dados contêm valores atualizados da “milha mais rápida” para cada dia de um determinado mês. Como o potencial de erosão é uma função altamente não linear da “milha mais rápida”, valores médios da mesma são inapropriados. A altura do anemómetro das estações meteorológicas deve ser corrigida em 10 metros de altura (altura de referência) usando a equação 2.8. Deve-se usar um perfil logarítmico da velocidade do vento para converter o valor da “milha mais rápida”  $u^+$  de um anemómetro (referenciado a uma altura de 10m) para a velocidade de fricção equivalente  $u^*$ , de modo a aplicar a seguinte equação:

$$u^* = 0.053 u_{10}^+ \quad (2.12)$$

em que  $u_{10}^+$  é a “milha de vento mais rápida” pelo anemómetro de referência para um período entre perturbações [m/s].

Esta equação assume um valor típico de 0.5 cm para a rugosidade em terreno aberto e é restrita para pilhas relativamente largas e aplanadas, ou áreas expostas com pequena penetração do vento pela camada superficial. Se o vento penetrar significativamente a camada superficial da pilha, é necessário dividir a pilha em subáreas representativas dos vários graus de exposição ao vento, onde a velocidade de fricção  $u^*$  se assume constante em cada uma delas. Para duas formas representativas de pilhas (cônica e oval com o topo aplanado), a relação entre a velocidade do vento na superfície  $u_s$  e a velocidade do vento  $u_r$ , deriva de estudos em túnel de vento. Os resultados estão apresentados na figura 2.1 e a fracção de área entre cada par que define o contorno é mostrada na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Distribuição em subáreas para regimes de  $u_s/u_r$ .

Subárea da pilha	Porcentagem da superfície da pilha			
	Pilha A	Pilha B1	Pilha B2	Pilha B3
0.2a	5	5	3	3
0.2b	35	2	28	25
0.2c	NA	29	NA	NA
0.6a	48	26	29	28
0.6b	NA	24	22	26
0.9	12	15	15	14
1.1	NA	NA	3	4

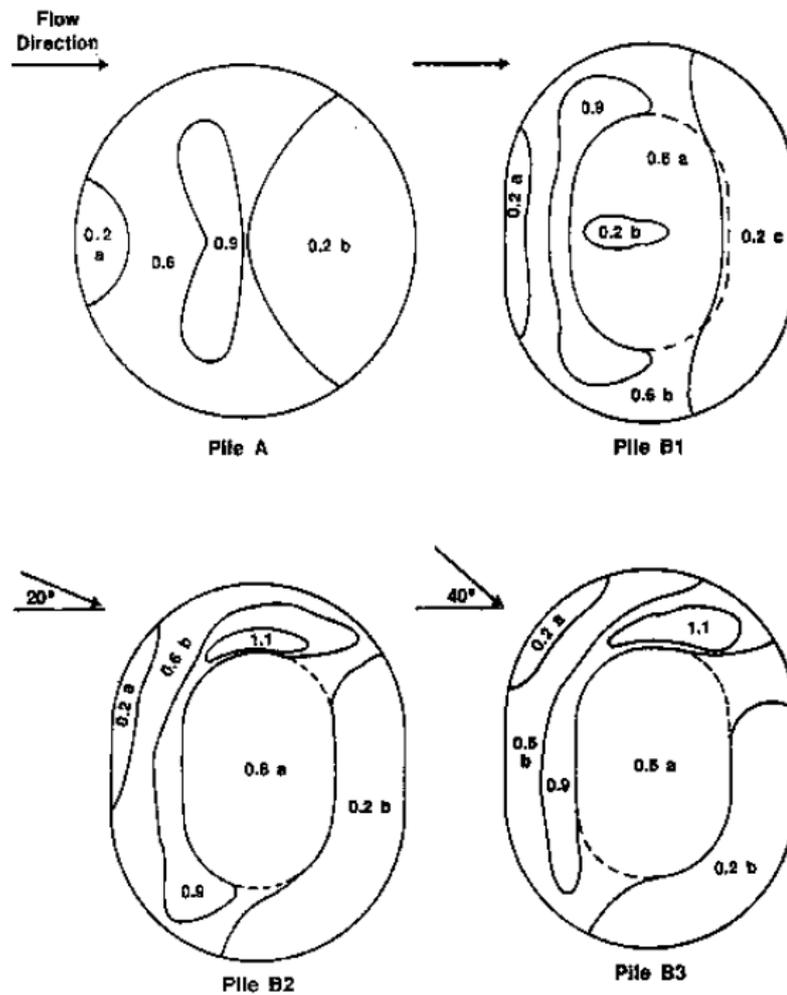


Figura 2.1 Contornos para a velocidade superficial normalizada  $u_s/u_r$ . (retirada da secção 13.2.5 *Industrial Wind Erosion do U.S. EPA AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors*)

Os perfis da velocidade inicial de fricção  $u_s/u_r$  podem ser utilizados para estimar a distribuição da velocidade de fricção superficial à volta de formas similares de pilhas:

Passo 1. Corrigir o valor de  $u^+$  para o período em questão medido pelo anemómetro de altura  $z$  para uma altura de referência de 10 metros  $u_{10}^+$  usando uma variação da equação 2.8.

$$u_{10}^+ = u^+ \frac{\ln(10/0.005)}{\ln(z/0.005)} \quad (2.13)$$

onde é assumida uma rugosidade de referência de 0.5 cm.

Passo 2. Obter a correspondente distribuição da velocidade do vento na superfície  $u_s^+$ , usando a figura 2.1.

$$u_s^+ = \frac{u_s}{u_r} u_{10}^+ \quad (2.14)$$

Passo 3: calcular a velocidade de fricção equivalente  $u^*$  para qualquer subárea da pilha que tenha uma gama limitada da velocidade do vento na superfície.

$$u^* = \frac{0.4 u_s^+}{\frac{25}{\ln 0.5}} = 0.10 u_s^+ \quad (2.15)$$

A equação 2.9, para o factor de emissão, assume que todo o potencial de erosão, correspondente à velocidade mais elevada do vento, é perdido durante o período entre perturbações. Como a milha mais rápida dura em média 2 minutos, que corresponde, de grosso modo, à meia vida do potencial de erosão, pode ser argumentado que o factor de emissões sobrestima as emissões de partículas. Contudo, há outros aspectos no processo de erosão que equilibram esta aparente aproximação conservadora, como por exemplo:

1. A “milha mais rápida” contém picos que superam substancialmente o seu valor médio.
2. Quando uma “milha mais rápida” ocorre, observam-se períodos de velocidade de vento ligeiramente mais baixa que contêm rajadas da mesma ordem de grandeza da milha mais rápida.

A implementação do procedimento descrito em cima é feita da seguinte maneira:

1. Determinar a velocidade de fricção inicial para um determinado material erodível (ver tabela 2.2 ou determinar a distribuição do agregado).
2. Dividir a área exposta em subáreas de frequência de solicitação constante  $N$ .
3. Criar uma tabela com as “milhas mais rápidas”  $u^+$  para cada frequência de solicitação e corrigi-las para 10 metros  $u_{10}^+$  utilizando a equação 2.13.
4. Converter os valores das “milhas mais rápidas”  $u_{10}^+$  para as equivalentes velocidades de fricção linear  $u^*$ , tendo em conta a exposição uniforme ao vento de superfícies não

elevadas, usando a equação 2.12, ou a exposição ao vento não uniforme de superfícies elevadas (pilhas), usando as equações 2.14 e 2.15.

5. Para as superfícies elevadas (pilhas), subdividir em áreas que tenham um  $N$  constante em subáreas de  $u^*$  constante e determinar o tamanho de cada subárea.
6. Tratar cada subárea (de  $N$  e  $u^*$  constantes) como fontes separadas, calculando o potencial de erosão  $P_i$  para cada período entre solicitações usando a equação 2.10 e o factor de emissões, usando a equação 2.9.
7. Multiplicar o factor de emissões resultante para cada subárea dividido pelo tamanho da subárea, e somar as contribuições de emissões de todas as áreas. Espera-se que as maiores emissões ocorram no dia mais ventoso do ano. As emissões máximas são calculadas considerando a milha mais rápida no período de um ano.

## **3 – Apresentação e discussão de resultados**

### **3.1 Pilha cônica**

De forma a comparar os resultados, da tensão de atrito superficial associada a uma velocidade de fricção responsável pelo transporte de sedimentos, no caso de uma pilha cônica, apresentados em *Badr e Harion, 2005*, foram consideradas várias hipóteses. Para algumas a base foi o próprio artigo, e para outras, por falta de informação, foram feitas considerações.

#### **3.1.1 Malha**

A geração numérica de uma malha tem associados parâmetros, que assumem valores característicos para cada problema físico a estudar. Para cada situação particular, estes parâmetros devem depender da forma do domínio e do tipo de escoamento.

Existem vários métodos para fazer a geração das malhas, que se podem dividir em duas categorias: métodos algébricos e métodos numéricos. Os primeiros, que são métodos iterativos, utilizam funções de interpolação para o cálculo das coordenadas dos nodos da malha, no interior do domínio. São principalmente utilizados em casos em que o escoamento é em regime transitório e que a forma das fronteiras é variável com o tempo. A sua maior desvantagem é a tendência para transmitir a informação da fronteira para o interior do domínio.

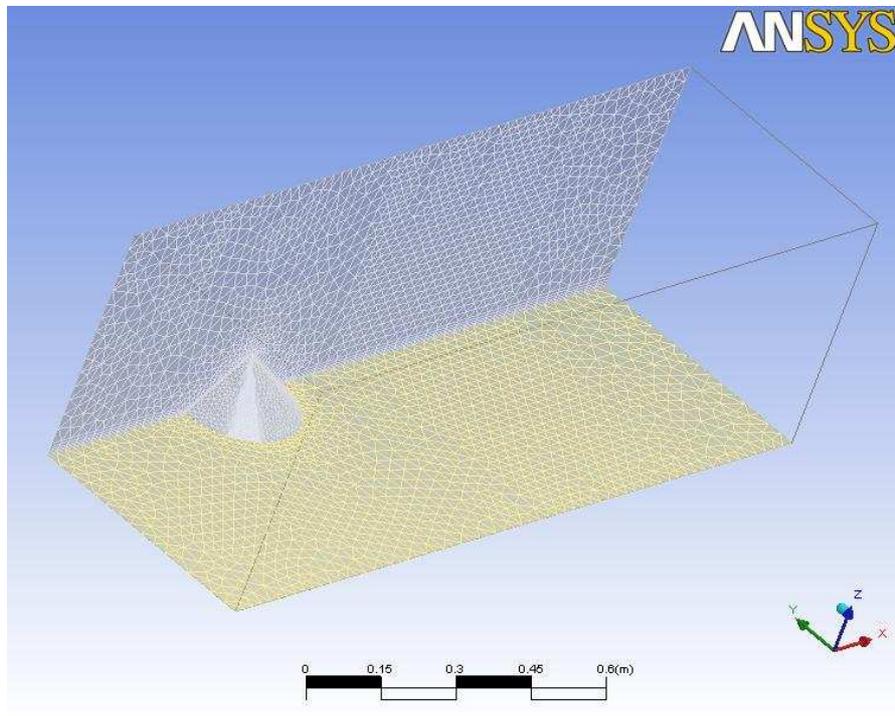
Os métodos numéricos baseiam-se na resolução de equações diferenciais que exprimem uma relação matemática entre as coordenadas Cartesianas e as coordenadas deformadas. Caracterizam-se assim por uma boa robustez e universalidade, sendo capazes de gerar malhas bastante apropriadas para o cálculo numérico de escoamentos.

Na tabela 3.1 indicam-se os valores para os parâmetros usados na criação da malha, utilizada no trabalho do presente capítulo. Adoptou-se uma malha mais refinada para a parte cônica do domínio.

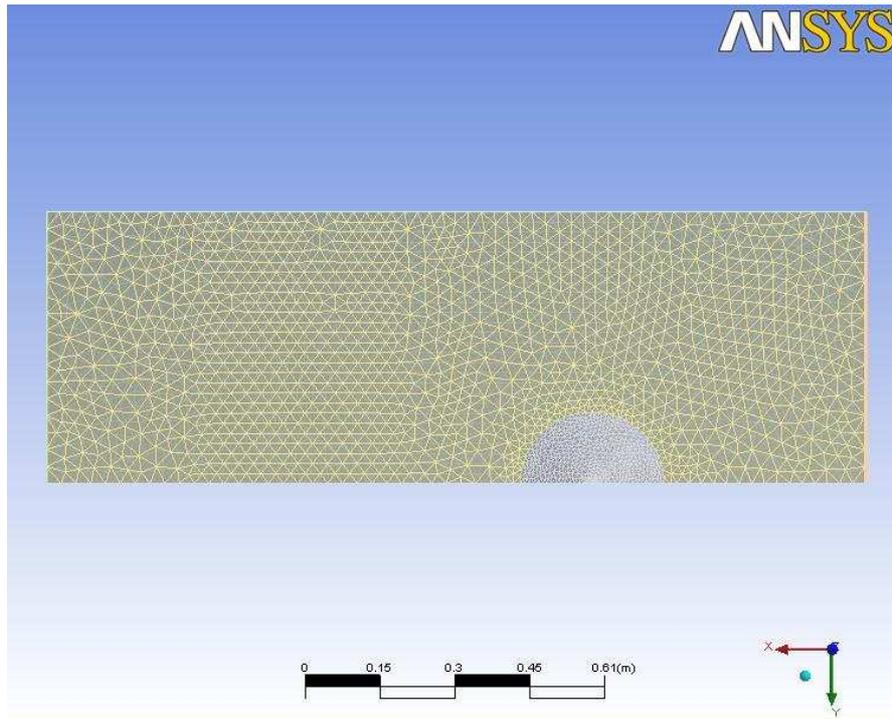
Tabela 3.1

Spacing	Face Spacing	Option	Geral	Cone
		Angular Resolution [Degrees]	30	18
		Minimum edge length [m]	0.0043	0.0043
		Maximum edge length [m]	0.03	0.01
	Body Spacing	Maximum spacing [m]	0.03	-
	Inflation	Number of inflated layers	5	-
		Expansion factor	1.2	-
		Minimum internal angle [Degrees]	2.5	-
		Maximum external angle [Degrees]	10.0	-
		Maximum Thickness [m]	-	0.087

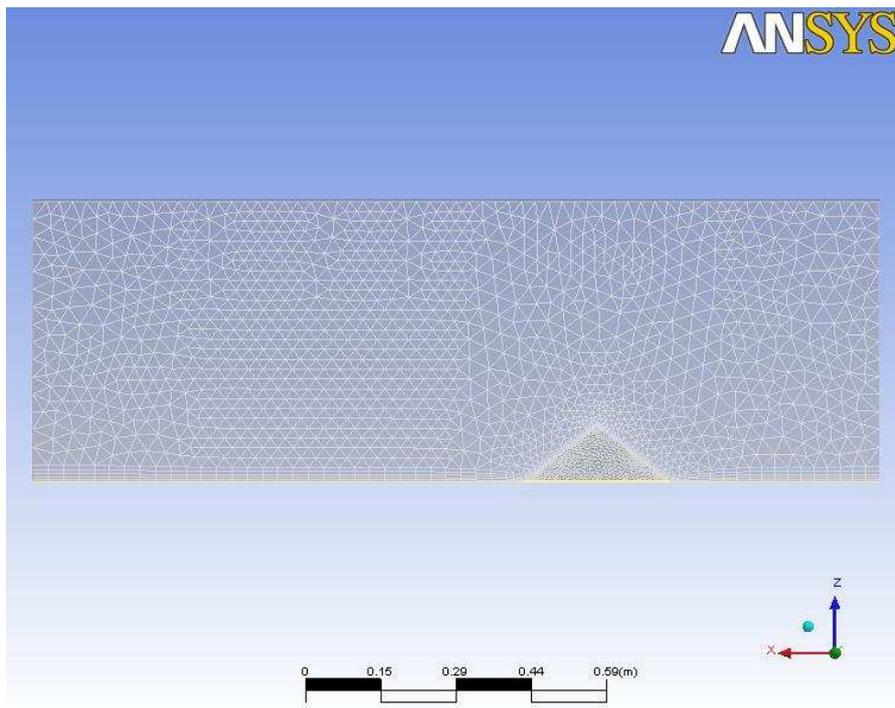
Na figura 3.1 é apresentada a malha depois de gerada no programa de geração numérica Ansys.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 Malha gerada (a) vista genérica (b) vista de topo (c) vista lateral.

### 3.1.2 Condições de fronteira

Utilizou-se para esta simulação uma pilha cônica com altura  $H$  de 11 cm e diâmetro da base  $D$  de 29 cm. O domínio é rectangular e tem as dimensões  $15H \times 10H \times 5H$ , de modo a que as fronteiras não interfiram nos resultados finais. Considerou-se para este caso somente metade do domínio, tendo em conta que os resultados para a outra metade são simétricos.

Foram realizados estudos para dois valores distintos da velocidade na entrada do domínio considerado.

A escolha do modelo de turbulência foi baseada no artigo referido anteriormente,  $k-w$  Shear-Stress-Transport e a intensidade de turbulência considerou-se média (5%).

#### 3.1.2.1 Entrada e saída

Considerou-se um perfil de velocidade na entrada dado pela equação 3.1:

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (3.1)$$

em que  $u$  é a velocidade longitudinal,  $U_0$  é a velocidade máxima no topo do perfil, com o valor de 4 [m/s] para o primeiro estudo e 10 [m/s] para o segundo,  $z$  é a altura,  $\alpha$  o expoente da lei de potência com o valor de 0.15 e  $\delta$  a espessura da camada limite com o valor de  $4H$ .

Para a saída do domínio atribuiu-se a opção *outlet* que assume um gradiente normal igual a zero para todas as variáveis do fluxo, excepto para a pressão.

#### 3.1.2.2 Paredes laterais e topo

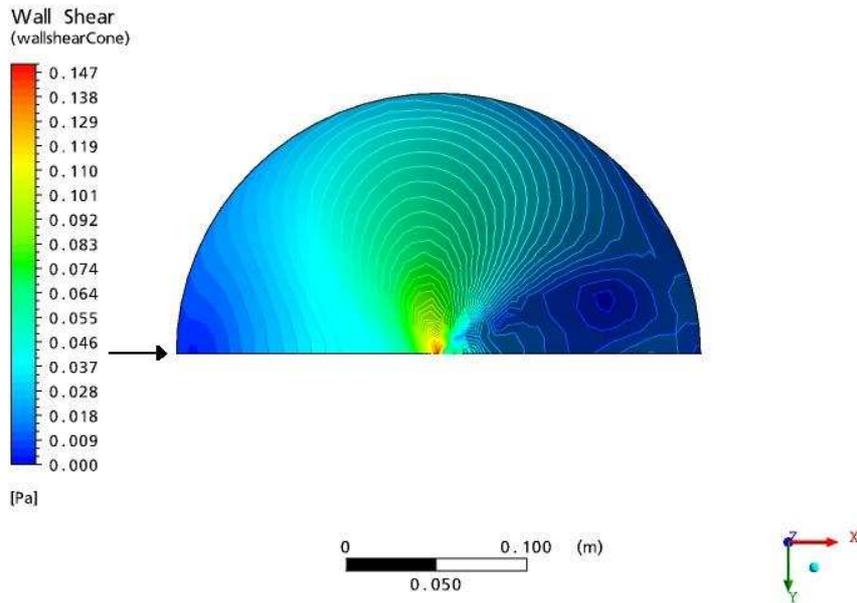
Para as paredes laterais e topo foi considerada a condição de simetria na fronteira, usado normalmente, quando a geometria física e a solução para o escoamento do fluido são simétricos, o que não é o caso da parede lateral mais afastada da pilha. Contudo, também é bastante aceitável já que o escoamento do vento induzido pelas pilhas está afastado o suficiente das fronteiras do domínio.

#### 3.1.2.3 Pilha e base

Para a pilha e a base assumiu-se a opção *fully rough walls*, com o valor de 0.12 [mm] para a rugosidade (valor assumido por *Badr e Harion, 2005*).

### 3.1.3 Resultados para a pilha cônica

Deste modo, os resultados obtidos para a tensão superficial na pilha cônica, para valores diferentes de velocidade, são os apresentados na figura 3.4. Na figura 3.5 apresentam-se os resultados obtidos por *Badr e Harion, 2005*.



(a)

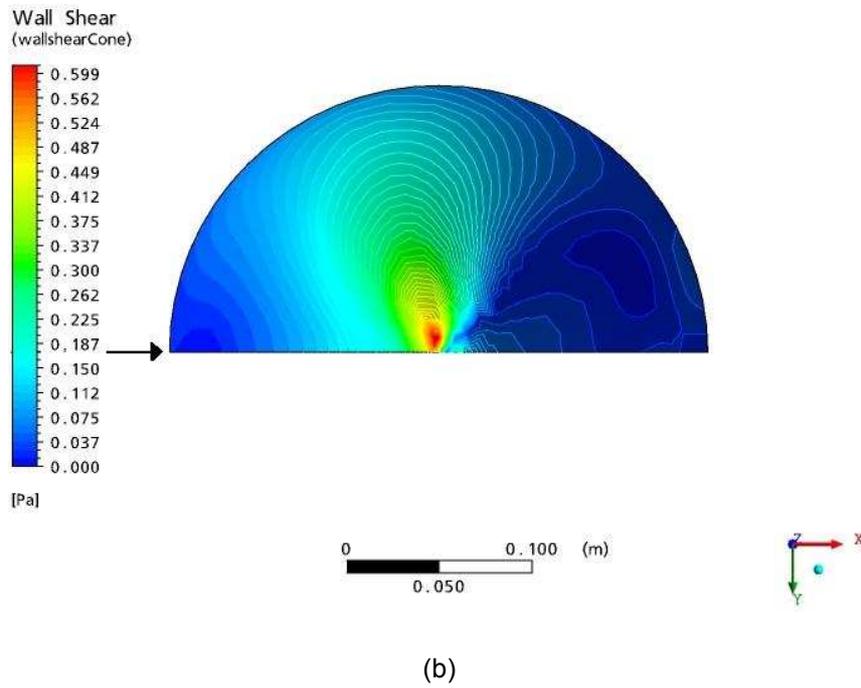


Figura 3.4 Tensão tangencial para a pilha cônica (entrada do fluxo de ar do lado esquerdo) (a) perfil de velocidade com  $U_0 = 4$  [m/s] (b) perfil de velocidade com  $U_0 = 10$  [m/s].

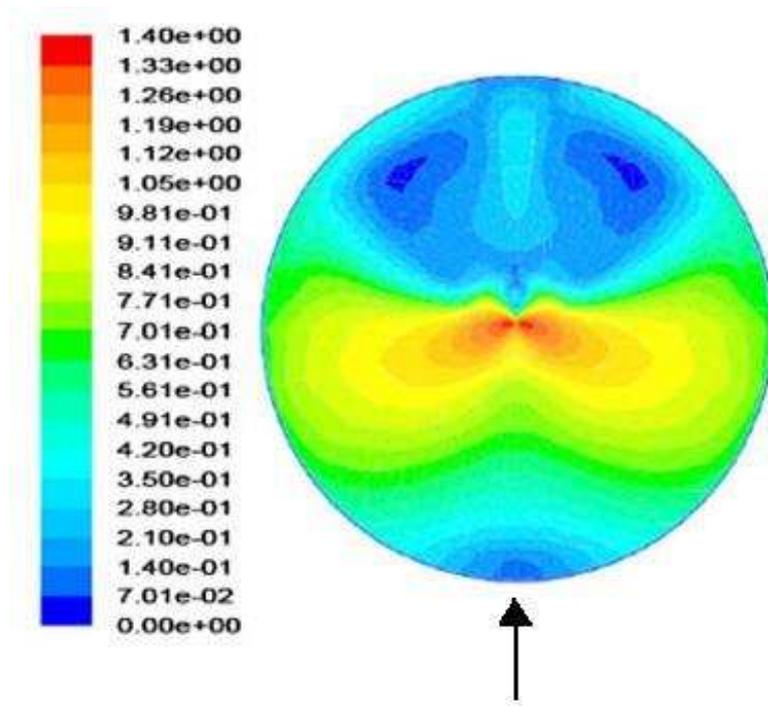


Figura 3.5 Valores da tensão tangencial para a pilha cônica apresentados em *Badr e Harion, 2005*, para  $U_0 = 4$  [m/s].

O fluxo é topograficamente acelerado e obrigado a passar por cima e à volta da pilha, originando uma zona protegida do vento e oposta relativamente à que está exposta ao escoamento, em que a velocidade do vento é menor e existe recirculação de ar. Como se pode verificar, o valor mais elevado para a tensão superficial é na crista da pilha, assim como era previsto. Coincide com a zona próxima da pilha que tem o valor mais alto para a velocidade do vento, e como consequência onde existe um maior potencial para ocorrer o arrastamento de partículas. Da análise das figuras 3.4 (a) e (b) retira-se que a variação da velocidade é um factor preponderante na avaliação da tensão superficial e, conseqüentemente, do potencial de erosão. Verifica-se que valores de velocidade mais elevados induzem um acréscimo na erosão superficial da pilha.

Analisando as figuras 3.4 (a) e 3.5, verifica-se que, apesar de existir uma distribuição da tensão tangencial semelhante para os dois casos, isto é, as zonas de valores máximos e mínimos coincidem, os valores são diferentes. O facto de o perfil de velocidade, para o caso dos resultados já publicados, ter sido medido em túnel de vento, poderá ser um dos motivos para esta divergência.

### **3.2 Dunas triangulares**

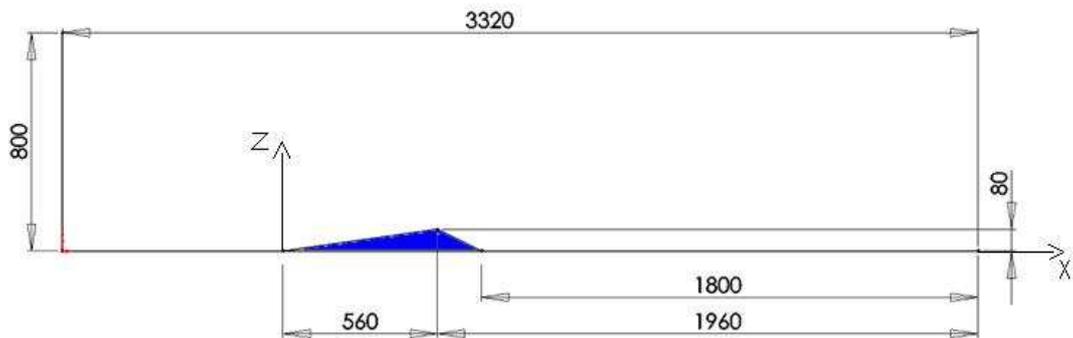
O segundo caso-teste, para validação de resultados, baseia-se na geometria estudada por *Walker e Nickling, 2003*.

Este estudo tem como objectivo a obtenção de resultados numéricos de forma a comparar com as medições em túnel de vento, realizadas para caracterizar a variação temporal e espacial da erosão superficial, em dunas isoladas e dunas pouco espaçadas, de forma triangular.

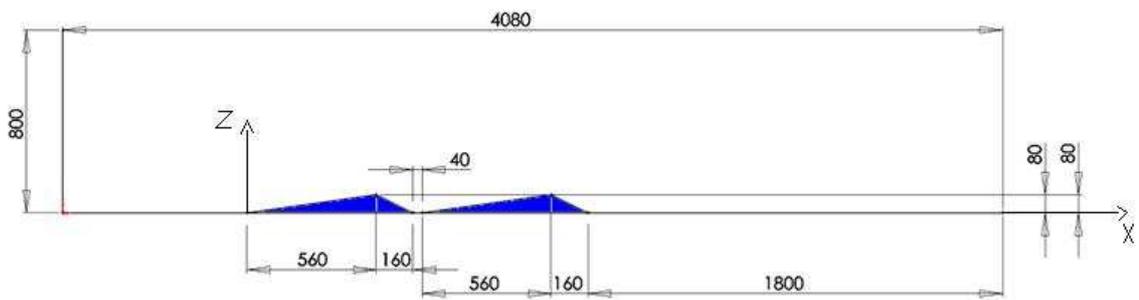
A malha gerada tem parâmetros semelhantes aos utilizados para o caso da pilha cónica.

Foram utilizados dois modelos de turbulência, o modelo  $k-\epsilon$  e o modelo  $k-w$  Shear-Stress-Transport. Para o primeiro utilizou-se um valor de 0.1 [mm] para a rugosidade superficial nas paredes, no modelo  $k-w$  SST esta não é considerada. A velocidade, no perfil de entrada, foi considerada uniforme com o valor de 13 [m/s].

A figura 3.5 mostra o esquema da geometria e as dimensões em [mm] utilizados para o presente caso.



(a)

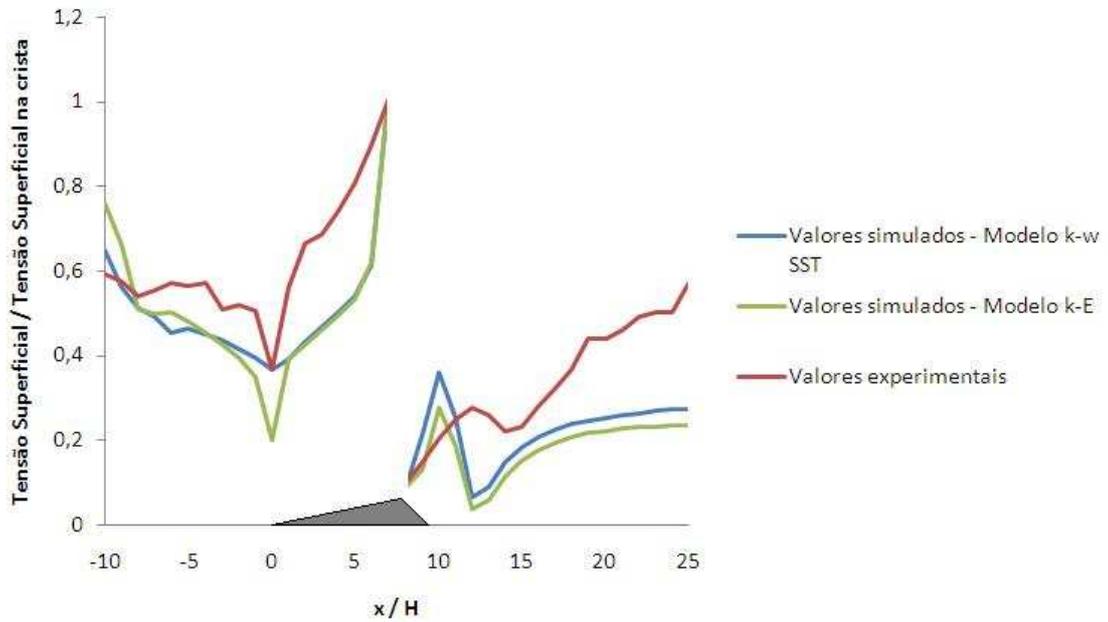


(b)

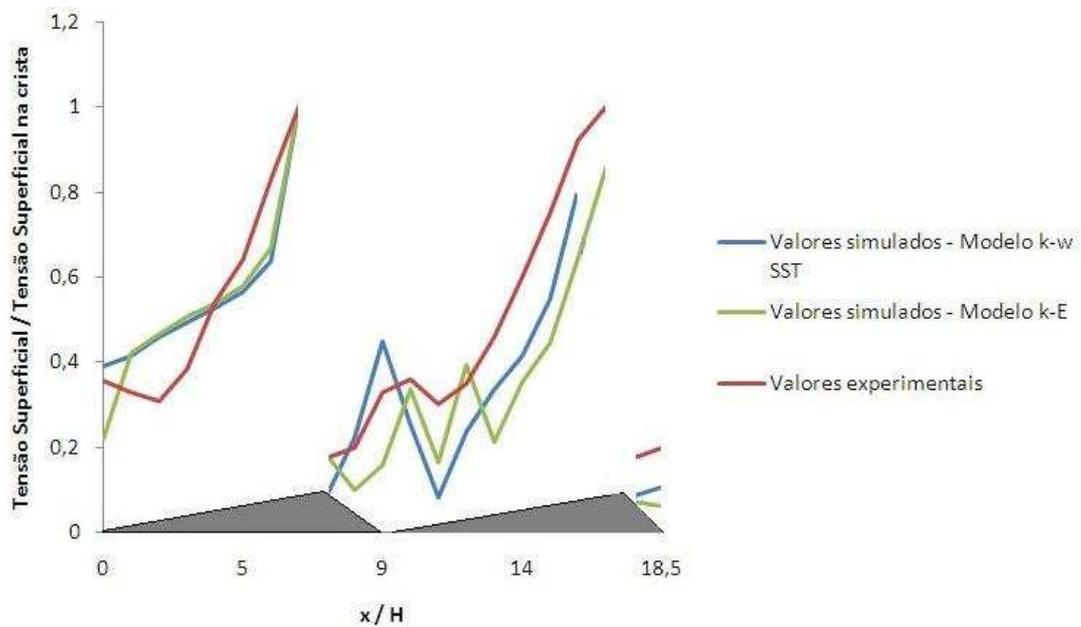
Figura 3.5 Geometria utilizada (a) para o caso de uma duna isolada (b) para o caso de duas dunas pouco espaçadas.

A tensão superficial normalizada (tensão superficial / tensão superficial na crista da duna) na duna isolada e nas dunas pouco espaçadas é apresentada nas figuras 3.6 (a) e (b), respectivamente. A tabela 3.2 faz referência aos pontos de recolamento do escoamento. Os valores nela apresentados foram determinados com base num estudo feito ao sentido da velocidade do escoamento. De referir que as medições apresentadas em *Walker e Nickling, 2003*, para o caso das dunas pouco espaçadas, foram feitas do seguinte modo: a primeira medição foi efectuada para a primeira duna considerando a segunda “muda”, e na segunda

medição foram trocadas as suas posições. No trabalho que se apresenta, a simulação foi efectuada para as duas dunas simultaneamente.



(a)



(b)

Figura 3.6 Valores experimentais e simulados para tensão superficial normalizada (a) para a duna isolada (b) para as duas dunas pouco espaçadas.

Tabela 3.2 Pontos de recolamento do escoamento em função da altura da crista  $h$  da duna.

	Valores experimentais	Valores simulados
Duna isolada	$u=13$ [m/s]	$u=13$ [m/s]
	Ponto de recolamento $15.0 h$	Ponto de recolamento $12.3 h$
Dunas espaçadas	$u=13$ [m/s]	$u=13$ [m/s]
	Ponto de recolamento $12.0 h$	Ponto de recolamento $11.5 h$

A tensão superficial começa por decrescer, caindo bruscamente no início da base da duna. Isto é causado por um gradiente adverso de pressão ou efeito de estagnação. São assim confirmadas as observações de velocidades de fricção reduzidas.

A redução da erosão superficial, no início da duna, implica a redução na capacidade de transporte de areia e um potencial de deposição nesta zona.

Na face a montante da duna, o aumento da tensão superficial na direcção do cume é devido à compressão das linhas de corrente, e dá-se a aceleração do escoamento.

Os valores normalizados da tensão superficial atingem o valor máximo no cume e é aproximadamente 2 a 5 vezes os valores que se obtêm no início da base.

Para as dunas pouco espaçadas entre si, na zona superior, ocorre um padrão similar e existe pouca diferença entre os valores normalizados.

No lado abrigado das dunas (jusante), o potencial de erosão superficial é relativamente baixo tanto em dunas isoladas como em dunas próximas, devido ao forte gradiente de pressão negativo.

No início da zona de separação (zona inclinada perto do cume do lado abrigado) a tensão reduz-se significativamente em ambas as configurações, aumentando rapidamente de seguida, apesar da desaceleração do escoamento nesta região. Isto é gerado devido ao escoamento invertido (*Walker, 1999*) que pode exercer uma tensão suficiente no sentido ascendente da duna, de modo a fazer o transporte de sedimentos.

A magnitude do efeito de deposição depende essencialmente da velocidade com a variação da tensão superficial e decresce com o aumento da velocidade do vento. Para velocidades mais elevadas, a contribuição de um escoamento agitado e da turbulência para a geração do desgaste superficial (e assim transporte de sedimentos), é menos influente. O factor que domina o escoamento, neste caso, é a transferência de quantidade de movimento pela corrente.

Como é visível nos gráficos da figura 3.6, os valores obtidos através da simulação numérica são razoavelmente próximos dos resultados experimentais, existindo algumas

variações mais acentuadas no caso das duas dunas espaçadas. Um dos motivos que pode ter influenciado estas diferenças foi o facto de as medições no túnel de vento terem sido feitas, inicialmente, para uma duna considerando a outra “muda”, e posteriormente, trocando as suas posições. A simulação numérica foi efectuada para as duas em conjunto.

Uma das considerações que foi feita e poderá explicar, em parte, alguma discrepância nos resultados foi ter-se admitido, neste trabalho, uma velocidade constante na entrada do domínio estudado. Tal assunção deveu-se à falta de informação em *Walker e Nickling, 2003* relativamente à forma do perfil experimental.

## 4 – Parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego

### 4.1 Apresentação de resultados

O estudo efectuado para avaliar o potencial de erosão, no parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego, teve como base uma maqueta (figura 4.1) elaborada há vários anos, usada nos anos 90, pelo então GMF (anterior à ADAI). Na actualidade (figura 4.2), a forma e disposição das pilhas de carvão no parque não se mantém igual, mas a falta de tempo e meios impediu a execução de uma nova maqueta com a actual disposição. De qualquer forma foram realizadas várias simulações para o caso da configuração anterior e foi previsto, de uma forma um pouco superficial, o potencial de erosão a que aquelas pilhas estariam sujeitas.

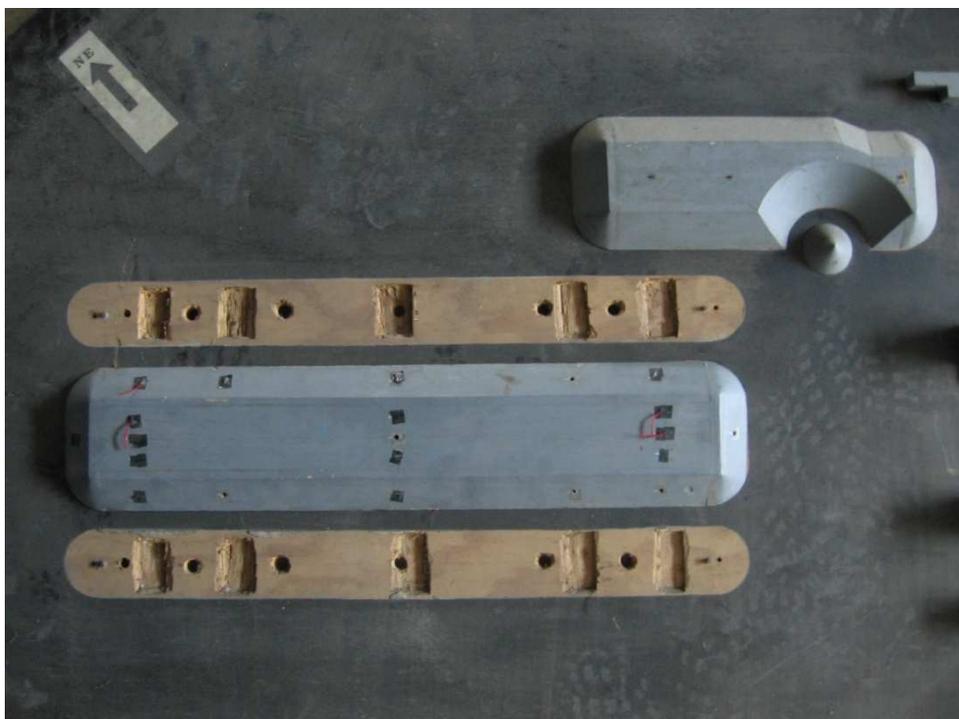


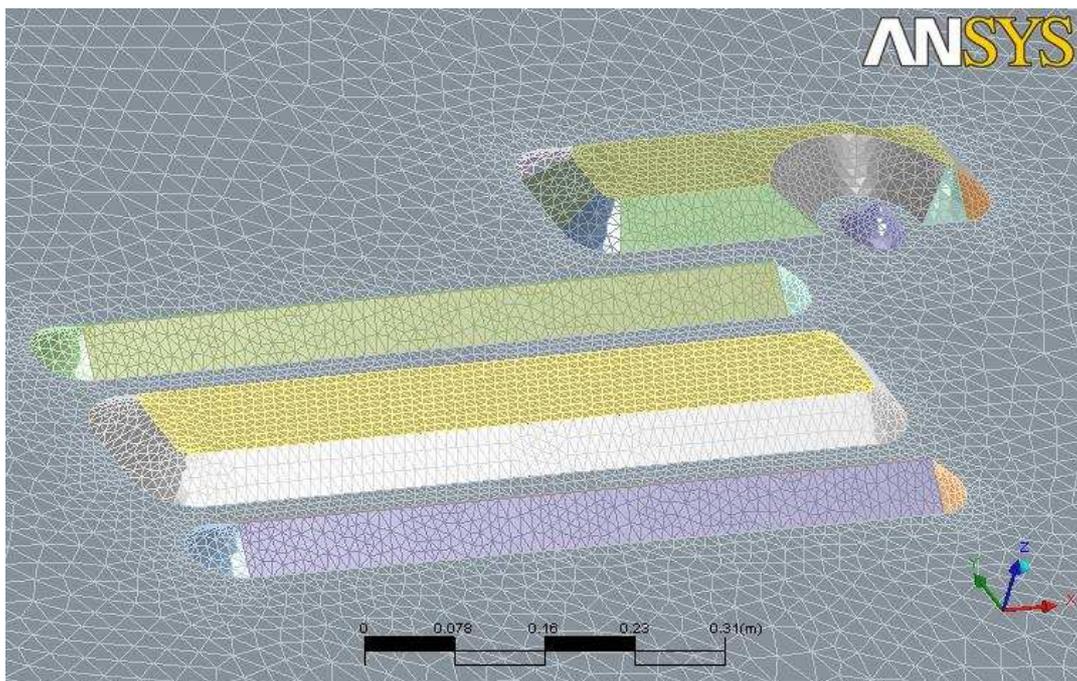
Figura 4.1 Maqueta do parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego.



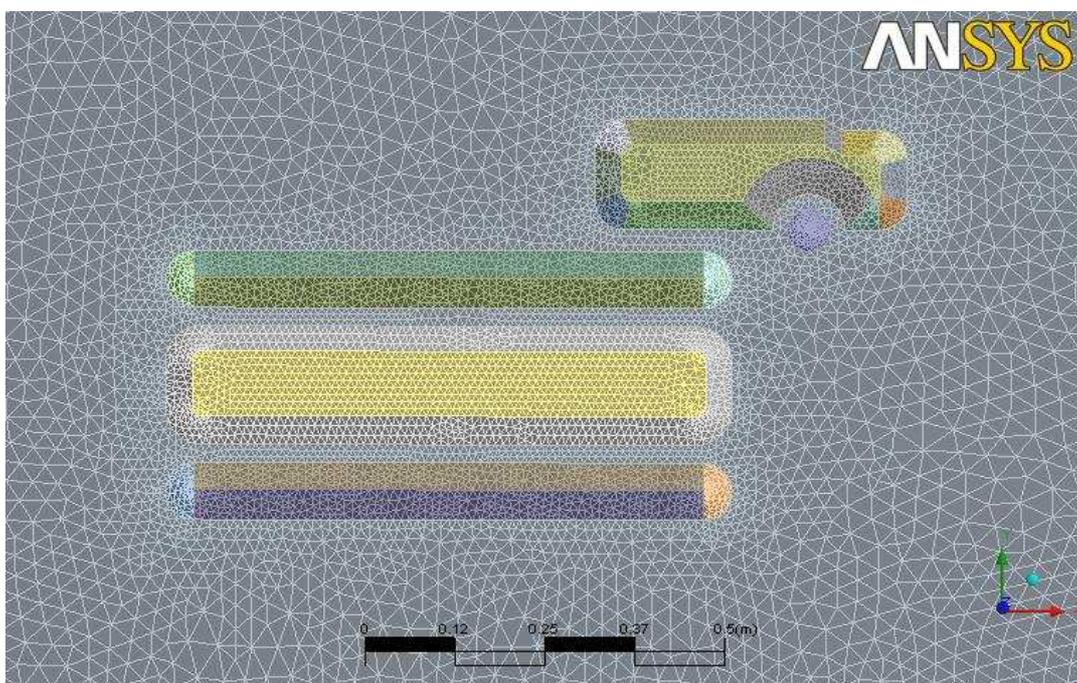
Figura 4.2 Parque de carvão da Central Termoelétrica do Pego na actualidade (fonte: Google Earth).

#### 4.1.1 Malha

A malha gerada para este estudo tem exactamente as mesmas características da malha utilizada no capítulo 3 para os casos da pilha cónica e das dunas. A figura 4.3 mostra a malha depois de gerada pelo software de simulação utilizado.



(a)



(b)

Figura 4.3 Malha gerada (a) vista genérica (b) vista de topo

#### 4.1.2 Condições de fronteira

Utilizou-se para esta simulação um domínio elaborado no software de desenho Solidworks 2007 a uma escala de 1:200.

Foi escolhido o modelo de turbulência k-ε, pois é um dos modelos mais comuns e promove estabilidade numérica e rapidez de cálculo.

O domínio foi dimensionado de forma a não existirem perturbações no escoamento causadas pelas fronteiras. Foram usados diferentes domínios para os diversos rumos do escoamento, Norte, Sul, Este, Oeste e Sudeste.

##### 4.1.2.1 Entrada e saída

Para as várias situações considerou-se à entrada do domínio uma velocidade constante  $u$  de 10 [m/s]. A saída foi considerada como uma fronteira aberta.

##### 4.1.2.2 Paredes laterais e topo

As paredes laterais e o topo do domínio foram igualmente encarados como fronteiras abertas.

##### 4.1.2.3 Pilhas e base

Para as pilhas e a base assumiu-se a opção *fully rough walls* com um valor para a rugosidade  $z_0$  de 0.1 [mm].

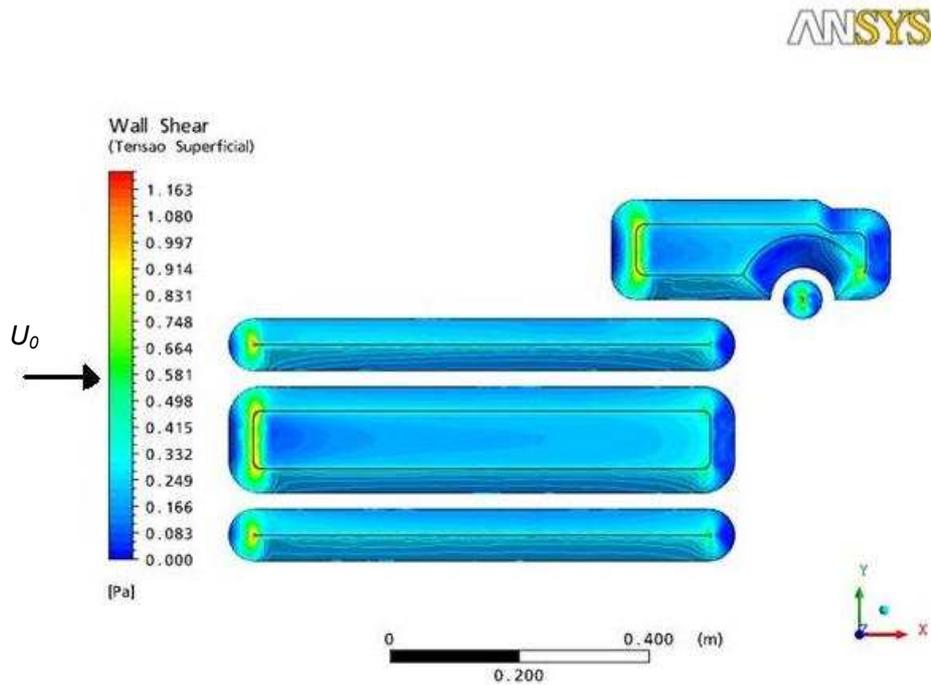
A figura 4.4 apresenta os resultados obtidos para a tensão superficial nas pilhas, que está associada a uma determinada velocidade de fricção, sendo estas as responsáveis pelo transporte de sedimentos. A tabela 4.1 mostra os valores, para o modelo e para o caso real (escala de 1:200), posteriormente calculados para o seu potencial de erosão. Para o determinar utilizaram-se os valores obtidos nas simulações para a tensão superficial e as equações 4.1 e 4.2.

$$u^* = \left( \frac{\tau_{TW}}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

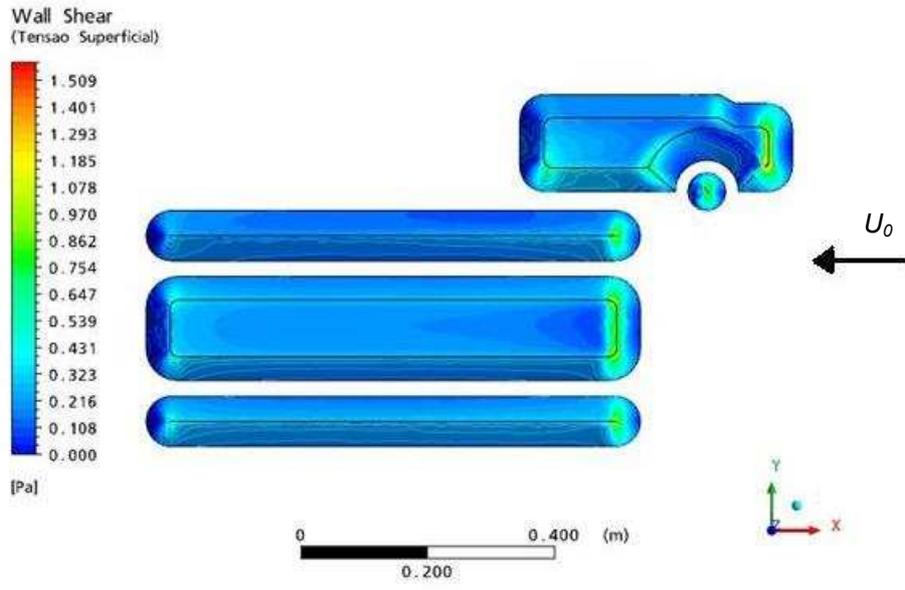
em que  $u^*$  é a velocidade de fricção,  $\tau_{TW}$  é a tensão superficial avaliada pelo software de simulação e  $\rho$  é a densidade do ar e tem o valor de 1,18 [Kg/m<sup>3</sup>].

$$P = 58(u^* - u_{c1}^*)^2 + 25(u^* - u_{c1}^*) \quad (4.2)$$

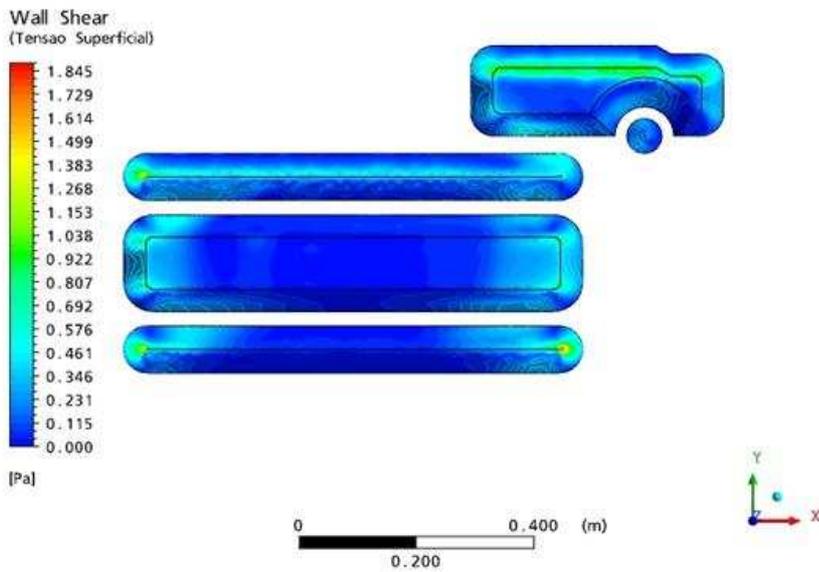
onde  $P$  é o potencial de erosão pretendido,  $u^*$  é a velocidade de fricção calculada através da equação 4.1, e  $u_{c1}^*$  é a velocidade inicial de fricção determinada com base na tabela 2.2. Neste estudo, para esta última variável, considerou-se uma média entre os últimos quatro valores da tabela referida.



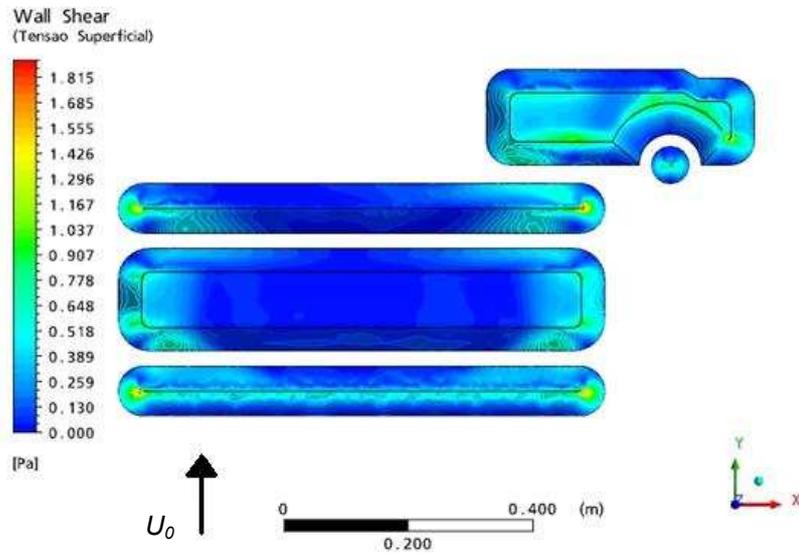
(a)



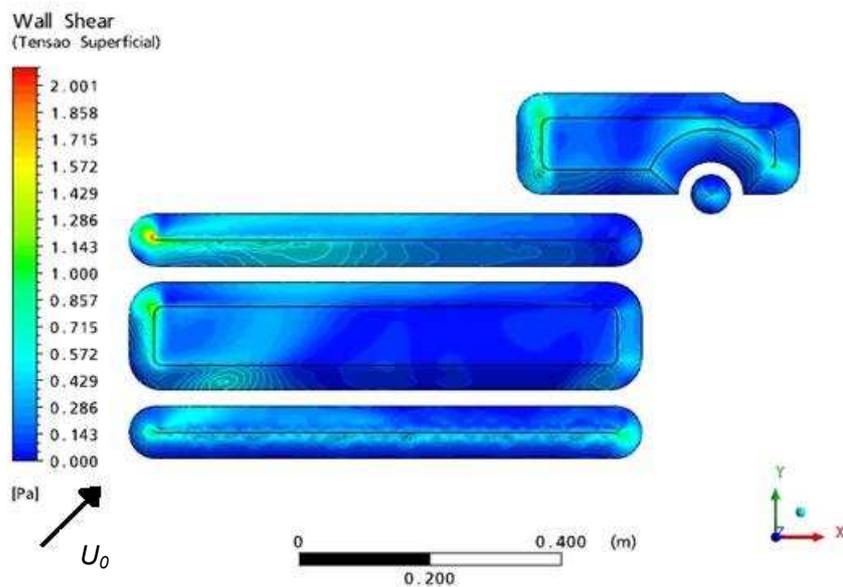
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.4 Tensão superficial para escoamentos nos sentidos: (a) Norte-Sul (b) Sul-Norte (c) Este-Oeste (d) Oeste-Este (e) Noroeste-Sudeste.

Tabela 4.1 Potencial de erosão calculado para o modelo e para o caso real.

	Potencial de erosão (Modelo) [g/Δt]	Potencial de erosão (Caso real) [g/Δt]
Escoamento no sentido Norte-Sul	3,92	1,57E05
Escoamento no sentido Sul-Norte	4,13	1,65E05
Escoamento no sentido Este-Oeste	3,97	1,59E05
Escoamento no sentido Oeste-Este	3,94	1,58E05
Escoamento no sentido Noroeste-Sudeste	3,93	1,57E05

## 5 – Conclusões

A variação da velocidade do vento sobre as pilhas de armazenamento, é bastante significativa quando se pretende avaliar o transporte de sedimentos.

Para o caso das dunas triangulares, e principalmente para a duna isolada, as simulações mostraram uma boa concordância entre valores numéricos e experimentais. Para as duas dunas pouco espaçadas, os resultados numéricos para a tensão superficial normalizada, apresentaram algumas variações em relação aos experimentais. Esta discrepância poderá dever-se ao facto de terem sido feitas algumas considerações por falta de informação relativa à forma do perfil de entrada do escoamento e nível de turbulência, utilizados em *Walker e Nickling, 2003*. A velocidade foi considerada constante na entrada do domínio, ao contrário do estudo experimental, em que foi utilizado um perfil de velocidade desconhecido. Outra diferença significativa foi o facto de a simulação numérica, para as duas dunas, ter sido executada para ambas em simultâneo. Nas medições em túnel de vento, o estudo foi realizado somente para uma e repetido para a segunda.

Através do estudo do parque de carvão do Pego obtiveram-se resultados para a quantidade de material das pilhas, que se perde devido à acção do vento. Os valores não são precisos quanto ao intervalo de tempo em que ocorre a perda de matéria, porque todo o procedimento seguido não é muito claro relativamente a esse aspecto, conforme a metodologia exposta no capítulo 2.

Os factores mais importantes na avaliação da velocidade de fricção, emissões de poeiras e deposição do material das pilhas de carvão são, sem dúvida, os níveis de turbulência no local, as configurações das pilhas e a complexidade do terreno. Estes, até ao momento, não têm sido considerados, convenientemente, nos estudos para sítios industriais. As simulações numéricas aqui apresentadas, relativamente ao parque de carvão da Central Termoeléctrica do Pego, podem fornecer uma oportunidade para um trabalho futuro de investigação, considerando todos estes factores importantes e ainda diferentes condições de escoamento.

## **Bibliografia**

Badr, T., Harion J. L. (2005), Numerical modelling of flow over stockpiles: implications on dust emissions, Energetics and Industrial Department, Research Center of the Ecole des Mines de Douai, France.

Badr, T., Harion, J. L. (2006), Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions, Industrial Energetics Department, Research Center of the Ecole des Mines de Douai, France.

Bennet, C., Meyers, J. (1982), Momentum, heat and mass transfer, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw Hill Book Company.

Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E. (1960), Transport phenomena, John Wiley and Sons, Inc.

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

Boussinesq, J. (1903), Theorie analytique de la chaleur, Vol. 2, Gautier-Villars, Paris.

EPA (1988), Update of fugitive dust emissions factors in AP-42, Midwest Research Institute, Kansas City, AP-42 Section 13.2.5 Industrial Wind Erosion.

Gray, D. D., Georgini, A. (1976), The Validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases, Int. J. Heat Mass Transfer., Vol.19.

Lee, S., Kim, H. (1999), Laboratory measurements of velocity and turbulence field porous fences, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 80, 311-329.

Liu X., Dong, Z., Wang, X. (2005), Wind tunnel modeling and measurements of the flux of wind-blown sand, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Chang and Natural Disaster, Laboratory of Blown Sand Physics and Desert Environments, China.

Nogotov, E., Berkovsky, B., Minkowycz, W. (1978), Applications of numerical heat transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

Patankar, S. V. (1980), Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

Parker, S. T., Kinnersley, R. P. (2004), A computational and wind tunnel study of particle dry deposition in complex topography, Division of Environmental and Risk Management, School of Geography, UK.

Schlichting, H. (1987), Boundary-layer theory, 6<sup>th</sup> Ed., McGraw Hill Inc.

Sorensen, M. (2003), On the rate of aeolian sand transport, Department of Applied Mathematics and Statistics, Denmark.

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

Torano, J.A., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J. M., Pelegry A. (2006), Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation, Mining and Civil Works Research Group, Spain.

Walker, Ian J., Nickling, William G. (2003), Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel, Department of Geography, University of Victoria, Canada.