

# ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DOS EFEITOS DE TELAS POROSAS SOBRE MODELOS DE PILHAS DE CARVÃO DA CVRD – VITÓRIA, ES

*Edith Beatriz Camaño Schettini<sup>1</sup>  
Acir Mércio Loredo-Souza<sup>1</sup>  
Austregésilo Guimarães<sup>2</sup>  
Jedilson Pimentel<sup>2</sup>  
Luiz Ignácio<sup>2</sup>*

## **Resumo**

Os efeitos da utilização de telas de proteção para reduzir o transporte eólico de partículas de carvão foram estudados através de ensaios em túnel de vento. Foram medidas as pressões médias e flutuantes sobre a superfície de um modelo reduzido, escala 1/300, de uma pilha de carvão representativa do pátio de carvão da *Companhia Vale do Rio Doce* (CVRD), em Vitória, ES. Distintas porosidades de tela (68%, 53%, 37%, 0%), bem como posições e alturas da mesma foram testadas. Além das medidas de pressões, o campo de velocidades sobre a superfície e entorno das pilhas foi obtido através de medições com sistema de anemometria de fio quente. A tela com porosidade 0% (placa) causou um aumento da zona de recirculação atrás da mesma, aumentando as sucções sobre a superfície da pilha. As telas com porosidades variando de 53% a 68% foram mais eficazes em reduzir as flutuações de pressão, sem aumentar significativamente as pressões médias. Estas pressões estão fortemente relacionadas com as emissões sobre a superfície da pilha, afetando diretamente o meio ambiente. Entretanto, as telas com porosidades intermediárias (37%) foram as mais eficientes em reduzir os picos de pressão que se desenvolvem a partir de incidências oblíquas do vento.

**Palavras-chave:** Carvão; Vento; Poluição.

## 1 INTRODUÇÃO

A Companhia Vale do Rio Doce necessita solucionar um problema de fuga de partículas das pilhas de estocagem de carvão dos pátios localizados em Tubarão, Vitória, Espírito Santo. Esta fuga de partículas resulta na perda do produto (carvão), além de resultar eventualmente num problema ambiental se as partículas atingirem a área urbana [1]. O fenômeno é ilustrado na Figura 1. Dentre as medidas implantadas pela CVRD para o controle dessas emissões de carvão, ressalta-se a aspersão de água com canhões aspersores. Para aprimoramento do controle existente, a CVRD decidiu estudar a eficácia da utilização de telas porosas (*wind fences*) para redução da velocidade do vento incidente sobre as pilhas e conseqüente redução do arrasto da partículas de carvão para a atmosfera.

O estudo tem por objetivo quantificar, através de modelos reduzidos em túnel de vento, os efeitos de proteção propiciados por telas porosas ao transporte eólico de partículas de carvão. Estudos semelhantes são descritos nas referências [2] e [3]. É realizada a modelagem de pilhas de carvão representativas da disposição existente no pátio de carvão da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) – Complexo Industrial de Tubarão [4], para diferentes configurações de telas e incidências de vento.

Este trabalho descreve as características do escoamento em torno de uma pilha de carvão isolada com o intuito de subsidiar a caracterização do fenômeno local de carregamento e início da erosão, bem como entender a influência que telas de proteção exercem sobre este fenômeno.



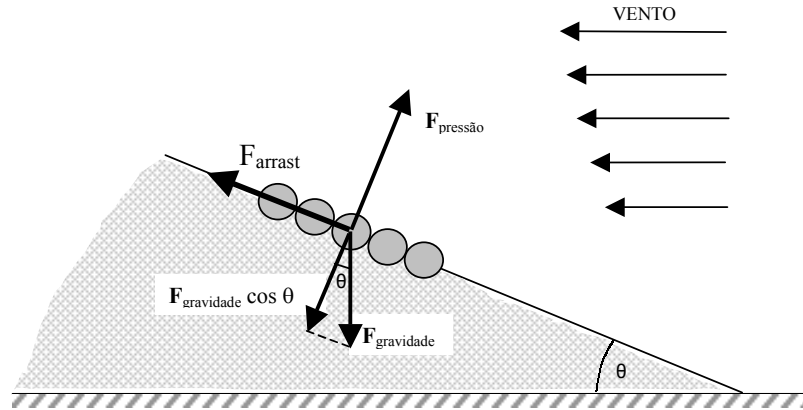
**Figura 1.** Transporte eólico de partículas de carvão.



**Figura 2.** Vista do pátio de carvão da CVRD.

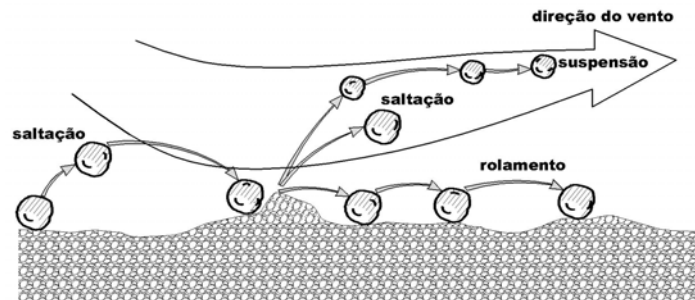
## 2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A erosão de partículas finas em pilhas de material estocado em pátios é conseqüência do vento atuante na região próxima à superfície da mesma. As forças que atuam sobre a partícula são as de gravidade, de pressão e de viscosidade. A força de gravidade depende do diâmetro do material e de sua massa específica; a de pressão e viscosidade dependem do campo de escoamento gerado em torno da pilha. A resultante destas três forças, se decomposta na direção do escoamento e na direção perpendicular ao mesmo, resulta nas chamadas forças aerodinâmicas: força de sustentação ( $F_S$ ) e força de arrasto ( $F_A$ ) (Figura 3).



**Figura 3.** Forças que atuam sobre a partícula sólida.

As forças aerodinâmicas são as responsáveis pelo movimento do grão. Três tipos de movimento podem ocorrer (Figura 4): (a) o rolamento, movimento devido ao arrasto do grão por rolamento, dependente do campo de velocidades do vento próximo à superfície da pilha; (b) a saltação, levantamento do grão por efeito do campo de pressões gerado pelo escoamento, porém com retorno do grão à superfície; e (c) a suspensão: levantamento do grão por efeito do campo de pressões gerado pelo escoamento e conseqüente carreamento do grão para a atmosfera.



**Figura 4.** Tipos de movimento de grãos devido aos efeitos do vento.

Além destes mecanismos de transporte, é importante entender as características do escoamento em torno da pilha. Em uma descrição qualitativa bi-dimensional do escoamento do ar em um plano vertical sobre um corpo rombudo com arestas vivas pode-se identificar três regiões distintas. Uma primeira região afastada do corpo com intensidade da turbulência relativamente menor (escoamento externo); uma segunda região com maiores intensidades da turbulência do que a primeira região, a esteira, localizada imediatamente sobre o corpo; e uma terceira região, a camada de vórtices, a qual corresponde a uma camada de vórtices desprendidos do ponto de separação do escoamento, localizada entre as outras duas regiões.

### 3 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Para o estudo das características do escoamento em torno da pilha foi construído um modelo reduzido em escala 1/125. O modelo foi instrumentado com 62 tomadas de pressão para medição das pressões médias e flutuantes em sua superfície. A Figura 5 mostra uma fotografia do modelo. Os ensaios foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul [5, 6], mostrado na Figura 6. Para este estudo foi simulado um

vento [8] correspondente a terrenos com rugosidades entre as categorias III e IV da NBR-6123 [7].

O estudo foi realizado para 41 configurações, as quais são expressas esquematicamente na Figura 7. As configurações representam distintas combinações de porosidade, altura e disposição das telas em relação à pilha. As configurações são representadas por códigos, os quais são explicados a seguir:

- *Posicionamento da tela*: “**AB**” representa tela na posição paralela ao maior eixo geométrico da pilha, “**CD**” representa tela na posição perpendicular ao maior eixo geométrico da pilha;
- *Porosidade da tela*: “**K**” representa porosidade de 68%, “**L**” representa porosidade de 53%, “**M**” representa porosidade de 37% (porém com maior espaçamento entre os fios da tela), “**N**” representa porosidade de 37% (porém com menor espaçamento entre os fios da tela), “**O**” representa porosidade de 0% (placa sólida);
- *Altura da tela*: “**R**” representa altura da tela igual à altura da pilha de carvão (1,0H – sendo H a altura da pilha), “**S**” representa altura da tela igual a uma vez e meia a altura da pilha de carvão (1,5H – sendo H a altura da pilha);
- *Afastamento da tela*: “**X**” representa afastamento entre tela e pilha igual à metade da altura da pilha (0,5H – sendo H a altura da pilha), “**Y**” representa afastamento entre tela e pilha igual a uma vez e meia a altura da pilha (1,5H – sendo H a altura da pilha).



Figura 5. Fotografia do modelo no túnel de vento.



Figura 6. Vista do túnel de vento de camada limite.

#### 4 MEDIÇÃO DAS VELOCIDADES DO VENTO

As velocidades em pontos selecionados sobre a superfície do modelo foram medidas através de um sistema de anemometria com sensores de fio quente.

Medições de velocidades instantâneas ( $U(z)$ ) do vento foram realizadas em diversas posições verticais localizadas na região da pilha. A partir destas, foram calculadas as velocidades médias temporais,  $\bar{U}(z)$ , e as flutuações de velocidade,  $u(z) = U(z) - \bar{U}(z)$ . Como variável representativa das flutuações de velocidade, foi utilizado o valor *rms* (*root mean square*) da flutuação de velocidade ( $u'(z)$ ). As duas grandezas, média e *rms*, foram normalizadas com a velocidade média no topo da pilha ( $U_{ref}$ ):

$$\bar{U}_{ad}(z) = \bar{U}(z) / U_{ref} \quad \text{e} \quad I(z) = u'(z) / U_{ref} \quad (1)$$

Sendo  $u'$  o valor *rms* ou desvio padrão das flutuações da velocidade do vento na direção do escoamento principal, em um ponto de cota  $z$ , e  $U_{ref}$  a velocidade média de referência do vento, na direção do escoamento principal, ao nível do topo da pilha (16 m).

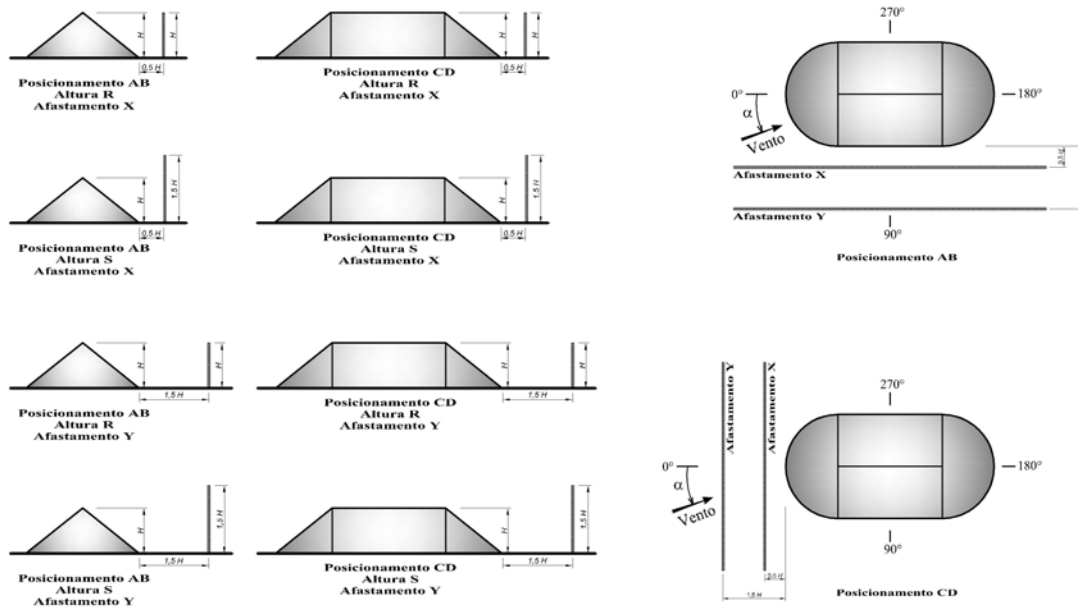


Figura 7. Configurações testadas no túnel de vento.

## 5 MEDIÇÃO DAS PRESSÕES NA SUPERFÍCIE DA PILHA

Foram medidas as pressões médias e flutuantes, devidas ao vento, na superfície da pilha simulada. O modelo foi instrumentado com 62 tomadas de pressão e as medições realizadas com transdutores eletrônicos de pressão. A partir dos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento, foram calculados os coeficientes de pressão, média e *rms* na superfície do modelo, definidos por:

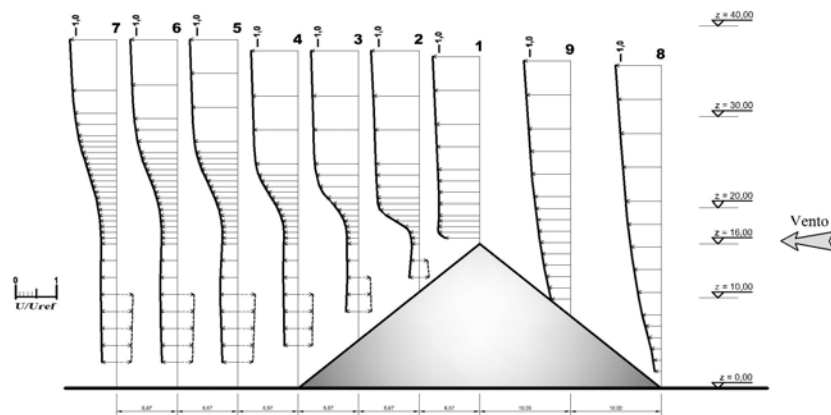
$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q} \quad \text{e} \quad \tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (2)$$

Sendo  $p(t)$  a pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência;  $\bar{p}$  o valor médio de  $p(t)$  para o intervalo de tempo de amostragem  $T$ ;  $t$  o tempo;  $T$  o intervalo de tempo de amostragem;  $q = \frac{1}{2} \rho U^2$  a pressão dinâmica de referência;  $\rho$  a massa específica do ar; e  $U$  a velocidade média de referência, medida a uma altura equivalente a 16 m, em escala real.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos perfis verticais de velocidade do vento em torno do modelo, alguns dos quais são apresentados nas Figuras 8 a 11. Representam as velocidades média e *rms* do vento para duas configurações de porosidade: 100% (sem tela) e 37%.

Para os casos “sem tela” e para a tela mais porosa (68%, tela K), as velocidades médias próximas à pilha são maiores do que as velocidades médias equivalentes para os casos com porosidades mais baixas (37% e 53%), mostrando que a redução da porosidade implica em uma redução da velocidade do vento. Com relação à intensidade da turbulência, a presença de uma tela menos porosa produz uma redução destes valores, implicando também em um efeito benéfico se comparado aos outros dois casos. A presença de telas e sua porosidade modifica a espessura da camada de vórtices: quanto menor a porosidade da tela, menor a espessura da camada. Estas observações não implicam em redução da erosão da particular, pois este fenômeno depende também de outros fatores tais como o campo de pressões. Com o intuito de ilustrar os resultados obtidos, valores de velocidade média negativos foram acrescentados aos perfis na região de recirculação, a sotavento da pilha.

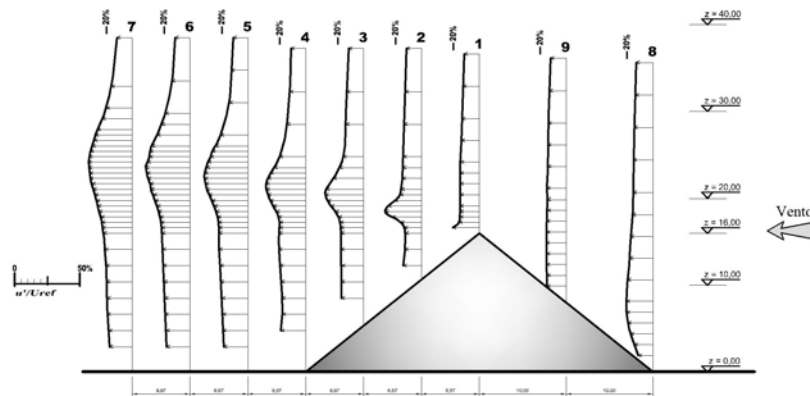


**Figura 8.** Perfis verticais da velocidade média do vento.  
Configuração: SEM TELA (Permeabilidade 100%).

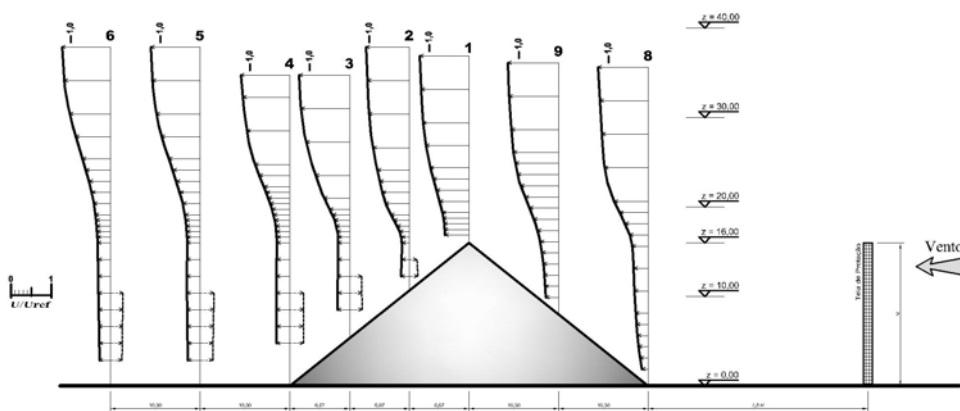
Perfis transversais de pressão são apresentados nas figuras 12 a 15 para dois ângulos de incidência do vento. A medição das pressões sobre a superfície da pilha, sem proteção por telas, mostra claramente a influência do ângulo de incidência do vento. Os maiores coeficientes médios de pressão e *rms* correspondem a ângulos de incidência do vento de 30 e 45°. As regiões mais afetadas são as próximas ao vértice da pilha e à aresta superior. Com a presença das telas, a configuração do escoamento não se modifica substancialmente. Porém, os valores de pressão na seção transversal da pilha apresentam variações, entre os diferentes casos, bastante significativas.

Para a configuração AB e mesmo afastamento, para a tela mais alta ocorre uma diminuição do  $\overline{C_p}$  (mais negativo implica em maior sucção) e um aumento do  $C_p'$ , o que favoreceria a erosão de material particulado. No caso “SEM TELA”, os valores médios mostram a presença de sobrepessões sobre uma grande área da face de barlavento da pilha, porém com valores de  $C_p'$  mais elevados que para as telas porosas. O caso da tela O (placa de porosidade 0%) apresenta os maiores valores absolutos de  $\overline{C_p}$  e  $C_p'$ , mostrando que a placa e a pilha formam uma cavidade. O

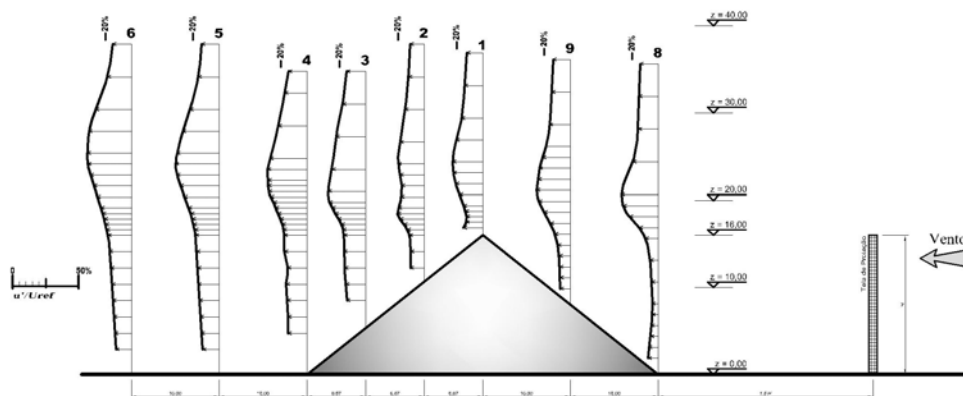
afastamento da tela também influi no campo de pressões, porém em menor medida que a porosidade ou a altura da tela. Para a configuração CD, novamente a altura da tela mostra um aumento no valor absoluto dos coeficientes de pressão, sendo que a Tela O apresenta os maiores valores.



**Figura 9.** Perfis verticais da intensidade da turbulência normalizada. Configuração: SEM TELA (Permeabilidade 100%).



**Figura 10.** Perfis verticais da velocidade média do vento. Configuração: TELA AB-MRY (Permeabilidade 37%).



**Figura 11.** Perfis verticais da intensidade da turbulência normalizada. Configuração: TELA AB-MRY (Permeabilidade 37%).

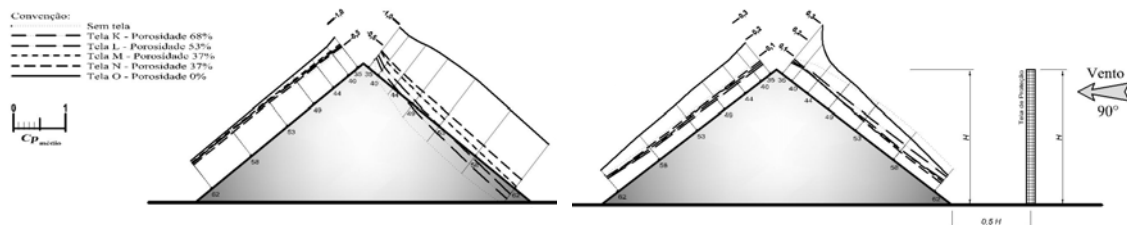


Figura 12. TELA AB-RX - MÉDIA (esquerda) e rms (direita).

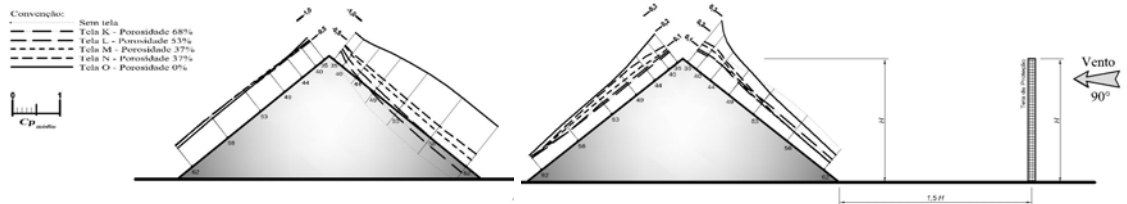


Figura 13. TELA AB-RY - MÉDIA (esquerda) e rms (direita).

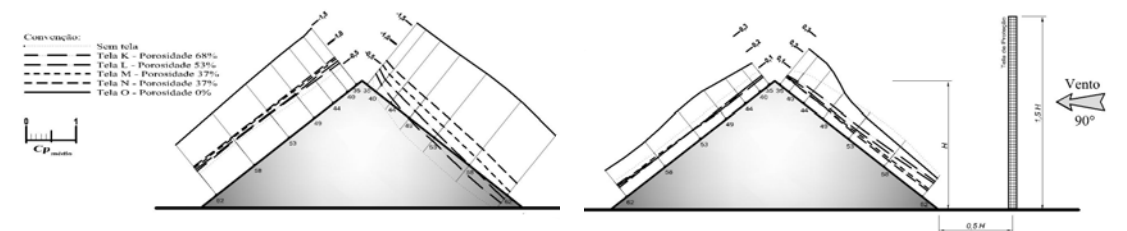


Figura 14. TELA AB-SX - MÉDIA (esquerda) e rms (direita).

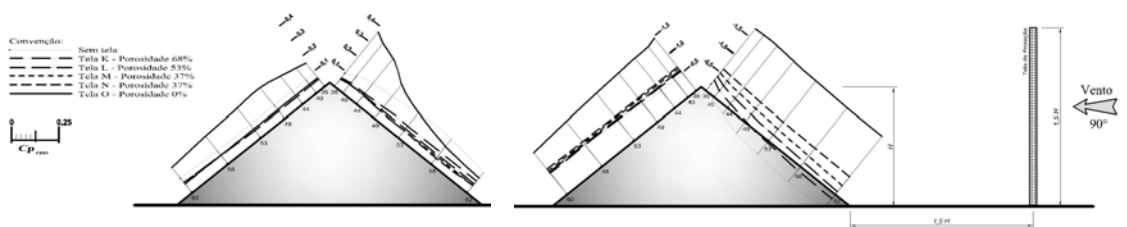


Figura 15. TELA AB-SY - MÉDIA (esquerda) e rms (direita).

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho descreve as características do escoamento em torno de uma pilha de carvão isolada com o intuito de subsidiar a caracterização do fenômeno local de carregamento e início da erosão, bem como entender a influência de telas de proteção no escoamento sobre as pilhas. Percebe-se claramente que as velocidades médias do vento são mais altas próximo ao topo da pilha, e que a presença das telas causa uma redução destas velocidades nas regiões mais críticas. Estas constatações não implicam diretamente em uma diminuição da erosão do material particulado, pois este fenômeno depende do efeito combinado dos campos de velocidades e pressões sobre a superfície da pilha. O campo de pressões tem uma influência preponderante para o início do movimento do material particulado, em relação à velocidade tangencial de arrasto da partícula.



A tela com porosidade 0% (placa) causou um aumento da zona de recirculação atrás da mesma, aumentando, portanto, as sucções sobre a superfície da pilha sendo imediatamente desconsiderada. As telas com porosidades variando de 53% a 68% foram mais eficazes em reduzir as flutuações de pressão, sem aumentar significativamente as pressões médias. Estas pressões estão fortemente relacionadas com as emissões sobre a superfície da pilha, afetando diretamente o meio ambiente. Entretanto, as telas com porosidades intermediárias (37%) foram as mais eficientes em reduzir os picos de pressão que se desenvolvem a partir de incidências oblíquas do vento.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem as valiosas contribuições dos membros do *Laboratório de Aerodinâmica das Construções*, especificamente Prof. Marcelo M. Rocha, Téc. Paulo F. Bueno, Eng. Adrián R. Wittwer, Eng. Elvis A. Carpeggiani, Eng. Gustavo J. Z. Núñez e Eng. Leandro I. Rippel. Os autores agradecem também à equipe da CVRD.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1 Companhia Vale do Rio Doce (2004) Especificações Técnicas. Contrato de prestação de serviço de estudos em túnel de vento P0.663/2003.
- 2 Lee, S.-J., Park, C.-W. (2000) The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84. pp. 101-118. Elsevier.
- 3 Park, C.-W., Lee, S.-J. (2002) Verification of the shelter effect of a windbreak on coal piles in the POSCO open storage yards at the Kwang-Yang works. *Atmospheric Environment*, 36. pp. 2171-2185. Pergamon.
- 4 Loredo-Souza, A.M., Schettini, E. B. C. (2004) Estudo em Túnel de Vento dos Efeitos de Proteção Propiciados por Telas Porosas ao Transporte Eólico de Partículas de Carvão Fase I – Caracterização do Terreno de Entorno do Pátio de Carvão da CVRD. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico. Porto Alegre. Março.
- 5 J. Blessmann, The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10 (1982) 231-248.
- 6 Cook, N. J. (1990) The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK.
- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- 8 Schettini, E. B. C., Loredo-Souza, A.M. (2004) Estudo em Túnel de Vento dos Efeitos de Proteção Propiciados por Telas Porosas ao Transporte Eólico de Partículas de Carvão Fase II – Caracterização do escoamento e Início de Erosão em uma Pilha de Carvão Isolada com tela de Proteção - CVRD. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico. Porto Alegre. Junho.

# WIND TUNNEL STUDY OF THE EFFECTS OF WIND FENCES ON COAL PILE MODELS OF CVRD – VITÓRIA, ES

Edith Beatriz Camaño Schettini<sup>1</sup>  
Acir Mércio Loredo-Souza<sup>1</sup>  
Austregésilo Guimarães<sup>2</sup>  
Jedilson Pimentel<sup>2</sup>  
Luiz Ignácio<sup>2</sup>

## Abstract

The effects of using wind fences to reduce wind-blown coal dust were studied through wind tunnel tests. The mean and fluctuating pressure distributions over the surface of reduced coal pile models were measured. The tests were performed at a 1/300 scaled model of a typical coal pile of the *Companhia Vale do Rio Doce* (CVRD) open storage yard, at Vitória, Brazil. Different fence porosities (68%, 53%, 37%, 0%) as well as different fence positions and heights were tested. Further to the pressure measurements, the field velocities over the surface and surroundings of the piles were obtained through hot-wire anemometry measurements. The fence with no porosity (0%) caused an increase in the re-circulating zone behind the fence, therefore increasing the negative pressures over the pile surface. The fences with porosities ranging from 53% to 68% were most effective in reducing the pressure fluctuations on the windward face of the pile, without increasing significantly the mean pressures over it. These pressures are closely related to the dust emissions from the surface, directly affecting the surrounding environment. Although most effective for reducing pressure fluctuations, the best combined effect together with the drag surface velocities were found for the fences with intermediate porosities.

**Key-words:** Coal; Wind; Pollution.