



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

## FoDAMI

## ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO NO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NAS PROXIMIDADES DE UM PÁTIO DE ESTOCAGEM DE MATERIAL

Stephanie C. Zucoloto<sup>\*1</sup>, Suellem M. Marques<sup>1</sup>, Reginaldo R.C. Paula<sup>1</sup>, Daniel Z. Matta<sup>1</sup>,  
Marcia S. G. de Oliveira<sup>2</sup>

<sup>\*1</sup> Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo –  
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil

<sup>2</sup> Secretária Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Vitória, Espírito Santo  
correo-e: stephanie.cz@hotmail.com.

### RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi investigar o campo de vento nas proximidades de um pátio de estocagem utilizando-se modelos em escala reduzida de pilhas de material. O estudo deste mecanismo é crucial para futuros estudos de como o escoamento do vento pode influenciar a dispersão e o transporte de material particulado proveniente das pilhas. Pois as emissões fugitivas de partículas das pilhas de estocagem em pátios abertos de áreas industriais podem causar sérios problemas ambientais e perdas econômicas [1]. Neste trabalho os experimentos foram realizados em um túnel de vento de camada limite atmosférica. Medições do perfil vertical de velocidade do vento foram realizadas com um tubo de Pitot acoplado a um manômetro digital. O pátio de estocagem foi formado por uma pilha isolada com vento externo incidindo na superfície a  $\theta = 0^\circ$  e  $90^\circ$  e por duas pilhas em paralelo com  $\theta = 90^\circ$ . Dados qualitativos das estruturas turbilhonares nas proximidades das pilhas foram obtidos com as técnicas de injeção de fumaça e de iluminação a laser. Não foi observada uma influência da pilha no campo médio da velocidade do vento quando este incidia paralelamente a sua superfície ( $\theta = 0^\circ$ ). Entretanto, para um vento externo incidindo a  $90^\circ$ , os resultados mostraram uma significativa influência da pilha no campo de vento, pois esta gerou um efeito de abrigo a uma determinada distância a jusante.

**Palavras chaves:** pilhas de material, pátios de estocagem, escoamento atmosférico, túnel de vento



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica e mineradora sempre foram reconhecidas pela sua importância no desenvolvimento econômico das nações, por fornecer insumos para infra-estrutura, suprindo as indústrias de construção, de bens de capital e de bens de consumo, especialmente automobilística [2]. No Brasil estas atividades desempenham um papel fundamental em termos econômicos, principalmente no Estado do Espírito Santo onde se localizam duas plantas que representam o maior polo industrial do Estado gerando renda, emprego e várias oportunidades de negócios. O Brasil é o 9º produtor mundial de aço bruto, sendo 2% do total mundial e 52,5% do total da América Latina [3].

Entretanto, junto com todos os benefícios, surge a problemática da poluição atmosférica, pois vários processos destas indústrias lançam na atmosfera gases e partículas, que degradam a qualidade do ar e conseqüentemente a saúde dos trabalhadores e da população residente no entorno. Neste contexto, tem-se o mecanismo de erosão de partículas provenientes dos pátios abertos de estocagem de materiais [4].

Pátios abertos é uma prática comum para armazenamento de grandes quantidades de minério, carvão, dentro outros materiais. Porém, as emissões fugitivas de material particulado das pilhas de estocagem além de causarem sérios problemas ambientais geram perdas econômicas para as indústrias [1]. O mecanismo de erosão eólica de partículas é muito complexo, pois depende de vários fatores, tais como: características do vento (direção, velocidade e rajadas); altura da pilha exposta ao vento; parâmetros das partículas (por exemplos, diâmetro, massa específica, geometria e teor de umidade) e topografia do local [5-7].

Um primeiro passo para o entendimento do mecanismo de erosão de partículas é conhecimento da aerodinâmica do escoamento atmosférico nas proximidades das pilhas de estocagem [8]. [9] utilizaram o pacote comercial ANSYS CFX nas simulações numéricas do escoamento nas proximidades de pilhas cônicas, ovais planas e semicirculares para determinarem a velocidade de fricção na superfície das pilhas e a emissão de partículas.

[10] realizaram simulações numéricas do campo de vento nas proximidades de diferentes de pilhas de materiais com várias alturas. As predições numéricas foram obtidas com o pacote comercial FLUENT. Todas as pilhas modeladas tinham o mesmo volume, forma e inclinações laterais e foram submetidas a diferentes velocidades do vento (5,10 e 15 m/s na altura das pilhas). Os resultados foram integrados ao uma modelo de emissão de partículas de carvão com velocidade de emissão de 7,6 m/s. Os resultados mostraram que o comprimento da pilha afeta a distribuição de velocidade



no seu entorno e que mudanças nas configurações das pilhas podem reduzir as emissões de partículas.

No presente trabalho foram realizados experimentos de túnel de vento de camada limite atmosférica para investigar o campo de vento médio e turbulento nas proximidades de modelos em escala reduzida de pilhas de estocagem de material de forma cônica. O objetivo principal foi obter um melhor conhecimento do campo de vento nas proximidades de pilhas de estocagem de material.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram executados experimentos em um túnel de vento de camada limite atmosférica de retorno aberto com seção de testes de (2,0 x 0,5 x 1,5) m. Foi simulada uma camada limite atmosférica em condições de estabilidade neutra com o vento externo incidindo em duas direções sobre a superfície da pilha de material ( $\theta = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Dois modelos de pilha em escala reduzida feitos de alumínio em três configurações de pátios abertos foram utilizados na simulação física do escoamento atmosférico, conforme mostra a Figura 1.

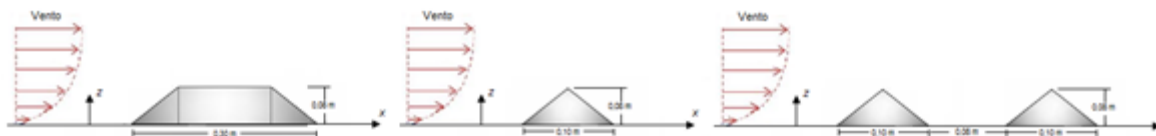


Figura 1 Representação esquemática das três configurações de pátio aberto que foram simuladas no interior do túnel de vento de camada limite atmosférica.

As técnicas de injeção direta de fumaça e iluminação com plano de laser (luz verde, 500 mW e 532 nm) foram utilizadas para uma análise qualitativa do campo instantâneo nas proximidades das pilhas. A Figura 2 mostra uma representação esquemática da seção de testes do túnel de vento e métodos de medição e visualização. Medições dos perfis verticais da velocidade do vento médio foram realizadas em diferentes pontos na direção do escoamento principal (eixo dos x) com o uso de um tubo de Pitot acoplado a um micromanômetro digital (TSI, EBT720). A Figura 2 mostra uma representação esquemática da seção de testes do túnel de vento e do aparato experimental. O número de Reynolds do escoamento,  $Re = 5,98 \times 10^3$ , teve como base a velocidade característica do vento na altura das pilhas e escala característica de comprimento a altura da pilha ( $h_p$ ). A massa específica e a viscosidade dinâmica do ar considerada foi de  $1,205 \text{ kg/m}^3$  e  $1,820 \times 10^{-5} \text{ kg/s.m}$ , respectivamente.

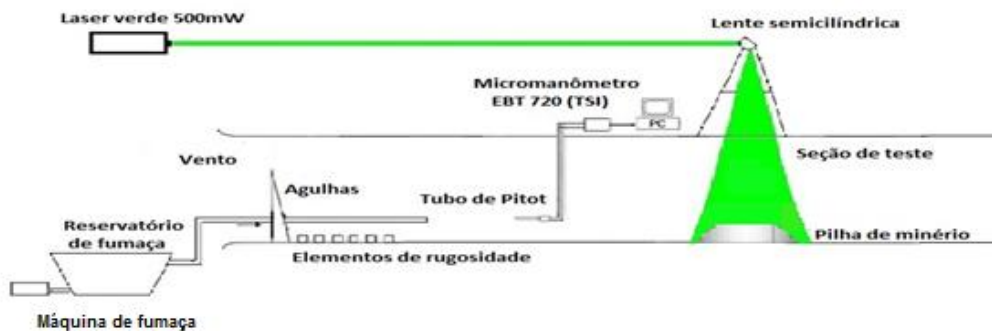


Figura 2- Esboço da seção de teste do túnel de vento, sistema de medição, iluminação e localização da pilha de minério para uma das configurações realizadas.

### 3.RESULTADOS

A Figura 3 mostra o perfil vertical de velocidade  $u(z)$  normalizado pela velocidade no topo da pilha  $U_p$  e a altura  $z$  normalizada pela altura da pilha  $H_p$ . Estes pontos foram medidos na linha central do túnel de vento com o vento externo incidindo paralelamente a pilha a superfície da pilha ( $\theta = 0^\circ$ ). A uma distância  $2H_p$  a montante da pilha os resultados mostram um perfil característico de camada limite atmosférica e que o escoamento não foi perturbado pela presença das pilhas. Os mesmos resultados foram obtidos nas medições realizadas no topo da pilha e nas distâncias  $2H_p$  e  $4H_p$  a sua jusante. Estes sugerem que para esta direção do vento incidente a pilha não exerce uma no campo médio da velocidade do vento, pois todos os perfis apresentaram a mesma forma.

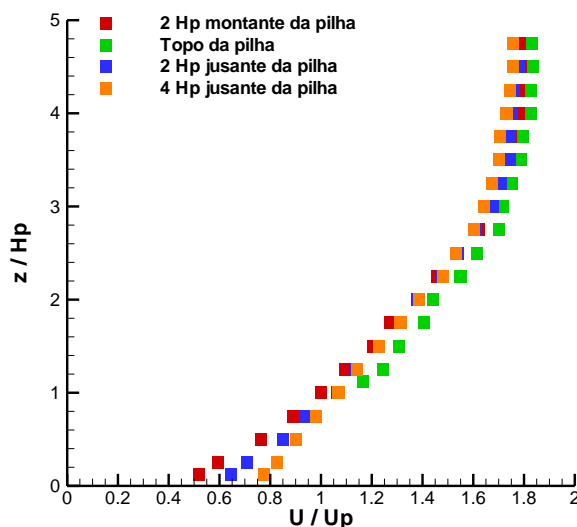


Figura 3 Perfil vertical normalizado da velocidade média do vento nas proximidades de uma pilha isolada ( $\theta = 0^\circ$ ).

A Figura 4 mostra o perfil vertical de velocidade  $u(z)$  normalizado pela velocidade no topo da pilha  $U_p$  e a altura  $z$  normalizada pela altura da pilha  $H_p$ . Estes pontos foram medidos na linha central do



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI

túnel de vento com o vento externo incidindo perpendicularmente a superfície da pilha ( $\theta = 0^\circ$ ). No topo da pilha para  $1,0 \leq z/h_p \leq 2,0$  ocorreu uma pequena aceleração do escoamento. A uma distância de  $6H_p$  a jusante da pilha o escoamento ainda foi perturbado pela sua presença.

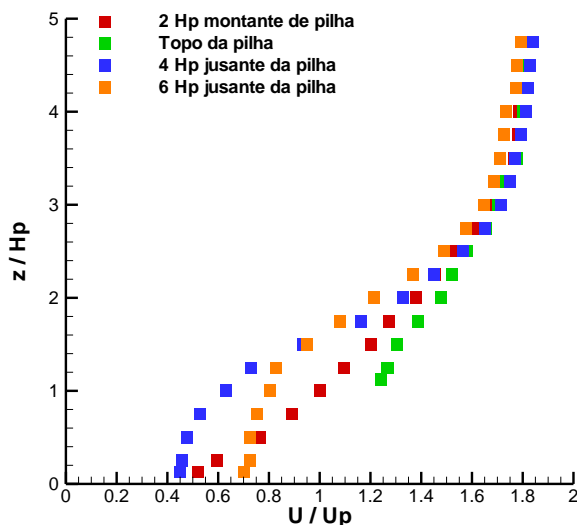


Figura 4 Perfil vertical normalizado da velocidade média do vento nas proximidades de uma pilha isolada ( $\theta = 90^\circ$ ).

A Figura 5 mostra o perfil vertical de velocidade  $u(z)$  normalizado pela velocidade no topo da pilha  $U_p$  e a altura  $z$  normalizada pela altura da pilha  $h_p$ . Estes pontos foram medidos na linha central do túnel de vento com o vento externo incidindo perpendicularmente na superfície da primeira pilha ( $\theta = 0^\circ$ ). Os resultados mostram uma significativa redução da velocidade do vento no topo da segunda pilha. A uma distância de  $4H_p$  da segunda pilha o escoamento recuperou as condições iniciais, apresentando o perfil de camada limite medido a montante da pilha.

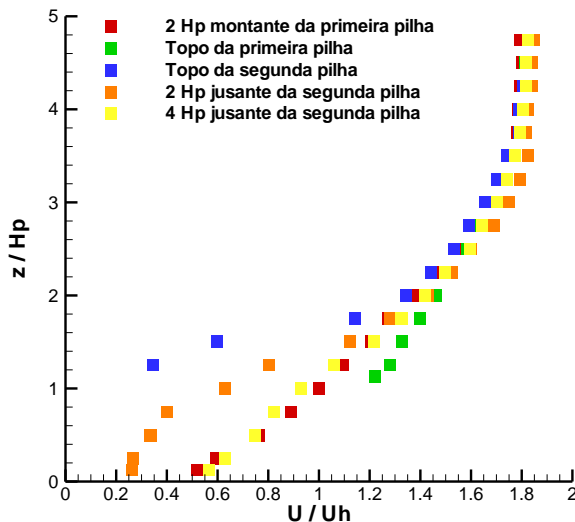


Figura 5 Perfil vertical normalizado da velocidade média do vento médio nas proximidades de dois modelos de pilhas ( $\theta = 90^\circ$ ).



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

A Figura 6 apresenta a resultados da visualização do escoamento nas proximidades da pilha isolada com o vento externo incidindo paralelamente na sua superfície ( $\theta = 0^\circ$ ). Na Figura 6(a) foram observadas pequenas estruturas turbilhonares na base da face frontal da pilha. A camada limite cisalhante sofreu uma separação na extremidade frontal do topo da pilha, conseqüentemente ocorreu uma recirculação nesta região, caracterizada por um escoamento reverso, veja Figura 6(b). Na Figura 6(c) na região de esteira próxima foi observado o desprendimento de vórtices próximo ao topo da pilha, bem como estruturas turbilhonares com diferentes escalas de comprimento.

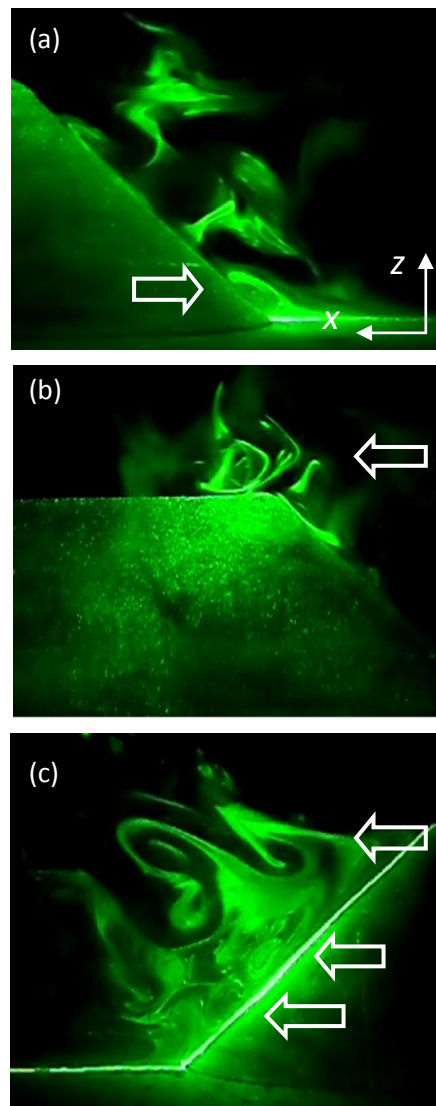


Figura 6 Visualização do escoamento nas proximidades de uma pilha isolada com o vento externo incidente a  $\theta = 0^\circ$ : (a) região incidente; (b) topo da pilha e (c) região de esteira próxima.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

A Figura 7 apresenta a resultados da visualização do escoamento nas proximidades da pilha isolada com o vento externo incidindo perpendicularmente na sua superfície ( $\theta = 90^\circ$ ). A Figura 7(a) mostra que na face frontal da pilha ocorreu a formação de uma estrutura turbilhonar com escala de comprimento da ordem  $z \cong 0,5 H_p$ . Os resultados da Figura 7(b) mostram que no topo da pilha ocorreu uma grande curvatura do escoamento em direção a região de esteira. A Figura 7(c) mostra a formação de uma grande região de esteira, onde pode se ver claramente uma difusão dos vórtices *shedding* à medida que eles foram transportados a jusante.

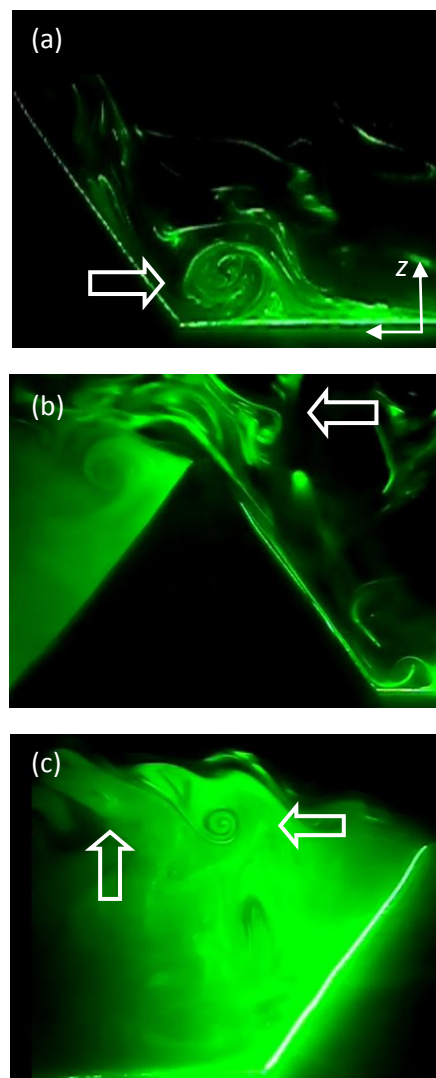


Figura 7 Visualização do escoamento nas proximidades de uma pilha isolada com o vento externo incidindo a  $\theta = 90^\circ$ : (a) região incidente; (b) topo da pilha e (c) região de esteira próxima.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

A Figura 8 apresenta a resultados da visualização do escoamento nas proximidades da pilha isolada com o vento externo incidindo perpendicularmente na sua superfície ( $\theta = 90^\circ$ ). Os resultados da Figura 8(a) mostram a formação de uma grande estrutura turbilhonar a montante da pilha. Na Figura (b) foi observado o desprendimento de vórtices na superfície de trás da pilha a montante, estes se deslocaram acima do topo das pilhas. Entre as pilhas foram observadas várias estruturas turbilhonares próximas ao solo. Na Figura 8(c) observou-se o mesmo padrão do escoamento que ocorreu no caso de uma pilha com vento incidindo com  $\theta = 90^\circ$ .

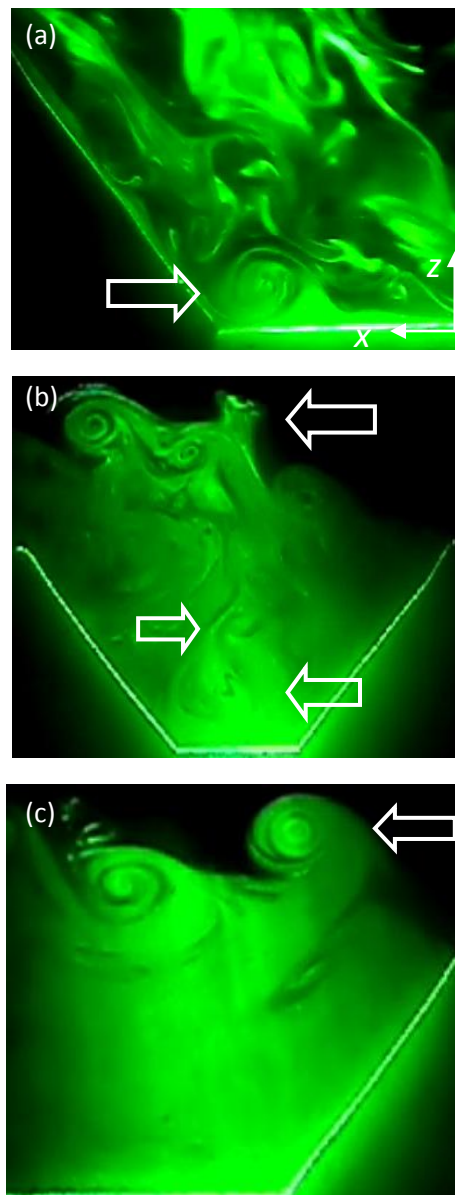


Figura 8 Visualização do escoamento nas proximidades de duas pilhas com o vento externo incidindo a  $\theta = 90^\circ$ : (a) região incidente da primeira pilha; (b) entre as pilhas e (c) região de esteira próxima da segunda pilha.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados estudos preliminares do padrão do escoamento nas proximidades de modelos em escala reduzida pilhas de armazenamento de material com o vento externo incidindo em duas direções sobre as superfícies destas ( $\theta = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ). Para um vento incidente com  $\theta = 0^\circ$  não foi observado uma influência da pilha no perfil vertical da velocidade média do vento, ou seja, neste caso a presença da pilha não reduz a velocidade do vento. Este resultado sugere que um aumento da velocidade do vento poderá ocorrer um arraste maior das menores partículas sobre a superfície da pilha. Com a mudança da direção do vento ( $\theta = 90^\circ$ ), observou-se a formação de uma zona de calmaria na região de esteira próxima das pilhas. Este comportamento foi mais acentuado no caso do escoamento nas proximidades de uma única pilha. Os resultados da visualização do escoamento mostram a formação de diferentes estruturas turbilhonares em regiões distintas nas proximidades das pilhas. Com o vento incidindo com  $\theta = 0^\circ$  ocorreu à formação de uma zona de recirculação no topo da pilha, o que poderá causar um maior arraste de partículas da superfície. Na região de esteira próxima para as duas direções do vento investigado foram gerados vórtices *shedding*, provavelmente também pode se ter uma maior arraste pelo escoamento de partículas menores. Portanto, a próximas etapas deste trabalho será investigar o arraste de partículas de minério para as três configurações apresentadas neste trabalho.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e da Arcelor Mittal Tubarão e o apoio da Secretária Municipal de Meio Ambiente de Vitória (SEMMAM-PMV).

## REFERÊNCIAS

- [1] Badr, T. e Harion, J., Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. Atmospheric Environmental, **Vol.** 41, pp. 360-368, 2007.
- [2] Governo Federal do Brasil, [www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl\\_1380735604.pdf](http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1380735604.pdf). Acessado em 20 de março de 2014.
- [3] BNDES, [www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Arquivos/conhecimento/relato\\_1.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Arquivos/conhecimento/relato_1.pdf), Banco Nacional de Desenvolvimento, Acessado em 29 de março de 2014.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

- [4] Loredo-Souza, A. M., Schettini, E. B. C., Guimaraes, A. F., Pimentel, J. I. e Ignacio, I. R., Wind Tunnel Testing of a Coal Pile Model of the CVRD - Vitória, Brazil, and The Effects Caused by Porous Fences, 10th ACWE, 2005, Louisiana, USA, CD - Tenth Americas Conference on Wind Engineerin, Pre-Proceedings, 2005.
- [5] Lee, S.; Park, C., The shelter effect of porous Wind fences on coal piles in POSCO open storage yard, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **Vol.** 84, pp.101-118, 2001.
- [6] Malcum, K. C., Avaliação dos efeitos de telas porosas sobre a aerodinâmica de pilhas de carvão, Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [7] Xuan, J., Turbulence factors for threshold velocity and emission rate of atmospheric mineral dust, Atmospheric Environmental, **Vol.** 38, pp. 1777–1783, 2004.
- .
- [8] EPA (Environmental Protection Agency), Technical Assessment Paper, Available Information for Estimating Air Emissions for Stone Mining and Quarrying Operations, Eastern Research Group, Inc., 1998.
- [9] Torano, J.,A., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J.M., Pelegry, A., Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation, Applied Mathematical Modelling, **Vol.** 31,2487–2502, 2007.
- [10] Cong, X.C., Cao, S.Q., Chen, Z.L., Peng, S.T., Yang, S.L., Impact of the installation scenario of porous fences on wind-blown particle emission in open coal yards, Atmospheric Environment, **Vol.** 45, pp. 5247-5253, 2011.