

X-020 - ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO SOBRE BARREIRAS DE PROTEÇÃO POROSAS APLICÁVEIS NO CONTROLE DE EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO

Nathalia Soares Covre⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pelo IFES, Campus Vitória. Técnica em Estradas pelo Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Campus Vitória.

Bruno Furieri⁽²⁾

Doutor em Engenharia Ambiental, Professor da Coordenadoria de Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES.

Endereço⁽¹⁾: Av. Vitória, 1729 - Jucutuquara, Vitória - ES, 29040-780 - Brasil - Tel: (27) 3331-2237 - e-mail: nathalia.covre@hotmail.com

RESUMO

As cercas porosas atuam como obstáculos ou barreiras a um escoamento atmosférico, as quais reduzem a velocidade dos ventos incidentes e influenciam a redução dos efeitos erosivos sob materiais particulados. Este estudo investigou o efeito de abrigo de uma cerca por meio de simulação numérica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Um modelo numérico tridimensional foi realizado para simular o campo de escoamento em torno da cerca através da resolução das equações de Navier-Stokes, utilizando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ no *software* Ansys Fluent. Foram simuladas duas situações para averiguar o comportamento do escoamento em torno da barreira, em que se observou a interação da cerca sem porosidade com o vento incidente, e em seguida adicionou-se um leito de areia para investigar o comportamento das partículas. A partir das simulações, foram avaliadas a velocidade média do vento incidente e a concentração de particulado antes e após a barreira, comprovando-se que a mesma reduz a velocidade do escoamento ao seu redor, criando zonas de recirculação e de baixa pressão à jusante, e atua protegendo o material particulado, evitando arraste e erosão. Os resultados, portanto, fornecem informações úteis para o entendimento do transporte de partículas, na presença de uma barreira ao escoamento, e permitem avaliar a eficiência da cerca no que tange à redução dos efeitos erosivos em pilhas de estocagem de materiais particulados. Por fim, vale ressaltar que se trata de uma abordagem recente e complexa utilizando uma ferramenta computacional.

PALAVRAS-CHAVE: Barreira de Proteção, Simulação Numérica, Poluição Atmosférica, Erosão Eólica, Efeito de abrigo.

INTRODUÇÃO

A qualidade do ar na atmosfera é resultado da interação de vários processos inerentes aos poluentes e à atmosfera dentre os quais pode-se citar emissão, transporte e remoção. Os poluentes atmosféricos dividem-se em dois grandes grupos: os materiais particulados (MP) e os gases. Especialmente ao MP, a geração de poluentes a partir de fontes difusas pode ser ocasionada por erosão eólica, quando há suspensão de partículas devido às tensões cisalhantes originadas do escoamento atmosférico turbulento sobre superfícies sólidas, onde as partículas estavam originalmente depositadas.

Pilhas de estocagem de materiais granulares atuam como fontes difusas encontradas, por exemplo, em unidades siderúrgicas e mineradoras. Os fenômenos de emissão e dispersão de MP provenientes dessas pilhas dependem de dois fatores principais: características do escoamento ao redor da fonte e granulometria do material estocado. A turbulência do escoamento atmosférico é fator primordial nas análises de emissão e dispersão de partículas provenientes de pilhas de estocagem (SADA, SATO, 2002; SANTOS et al., 2009). A presença de particulado em suspensão na atmosfera impacta diretamente sobre o ambiente do local próximo a fontes difusas e aos que ali residem, podendo causar danos à saúde, como problemas cardíacos e respiratórios nos habitantes da região.

O crescente interesse na redução das taxas de emissão de material particulado à atmosfera tem levado indústrias responsáveis por elevados índices de emissão a adotarem medidas de proteção ambiental para manterem suas atividades de forma mais sustentável. Assim, empresas que possuem pátios de estocagem de

matéria-prima tem, dentre várias medidas, adotado a instalação de *wind fences* - cercas porosas utilizadas como obstáculos ou barreiras a um escoamento atmosférico.

As cercas porosas são estruturas artificiais aplicadas no controle da localização e da taxa de erosão (ou deposição) eólica. Essas cercas são encontradas em desertos, praias ou próximas a construções feitas pelo homem onde a necessidade de controlar a sedimentação eólica é reconhecida – motivo pelo qual as empresas têm adotado o uso das mesmas em seus pátios. As cercas porosas em si podem ter dupla função: reduzir a velocidade dos ventos incidentes (nesse caso, são referidas como *wind fences*) ou atuar como barreira física ao material particulado, que não consegue ser transportado pelos pequenos poros no obstáculo (comumente chamadas de *sand-trapping fences*, cercas de arrasto de areia) (SHERMAN et al., 2015).

Essas barreiras têm sido aplicadas no controle da poluição atmosférica, já que se observa uma correlação entre a redução da energia cinética do vento após incidência sobre uma *wind fence* e a emissão de materiais particulados a partir de fontes próximas sob a ação de processos erosivos (LEE et al., 2002; MOHAJER et al., 2011; SHI et al., 2015). Para esse efeito, literatura pertinente dá a essa correlação o termo efeito de abrigo.

As *wind fences* têm vantagens ambientais sobre outros métodos de redução de escoamento por barreiras, como cinturões-verdes (que funcionam como redutores naturais da velocidade do vento). Os cinturões-verdes necessitam de área e relevo ideal para implementação, enquanto as barreiras porosas podem ser aplicadas em terrenos mais variados, independente do ambiente ao redor (ZHANG et al., 2010).

Os estudos mais recentes encontrados na literatura mostram que essas cercas modificam características do vento incidente, reduzindo sua capacidade de erosão e transporte de poluentes. Contudo, muito ainda deve ser investigado a respeito destas cercas, de modo a dimensionar de forma mais econômica e com a maior eficiência possível na proteção das fontes difusas devido à erosão do vento.

Desde a última década, simulações na área de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) vem sendo aplicadas como ferramentas de estudo de problemas ambientais como a poluição atmosférica, por serem capazes de gerar bons resultados enquanto minimizam tempo e custo se comparado a investigações experimentais (LEUNG et al., 2015). A ferramenta computacional é muito poderosa e tem inúmeras aplicações nos ramos da Engenharia. O presente trabalho adota uma abordagem computacional, apresentando a modelagem de um sistema contendo material particulado próximo a uma barreira sólida para a simulação da influência da mesma no abrigo de MP e comportamento do vento incidente.

OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo é realizar simulação numérica no programa de CFD Ansys Fluent, de um sistema contendo leito de partículas e barreira replicando as condições de um túnel de vento, a fim de validar os resultados experimentais observados em artigos de referência. São objetivos específicos do presente trabalho: (i) discutir fisicamente o escoamento modificado e o fenômeno de movimentação das partículas devido à presença das barreiras de proteção e (ii) examinar os parâmetros que governam sua eficiência e a influência destas na redução da erosão eólica de pilhas de materiais particulados, utilizando a praticidade das simulações numéricas desenvolvidas no Ansys Fluent.

METODOLOGIA

O Ansys Fluent, programa utilizado para a execução da simulação, trabalha a partir do método dos elementos finitos, elaborado para resolver equações diferenciais parciais (equações que modelam problemas que envolvem funções desconhecidas de várias variáveis como a propagação do som ou calor, eletrostática, eletrodinâmica, dinâmica dos fluidos, elasticidade, dentre outras). Neste método, o domínio computacional divide-se em uma quantidade inteira de subdomínios (denominados “elementos”), os quais mantêm as mesmas propriedades do meio original. Cada elemento é uma variante dependente de um campo de elementos que variam ao longo de todo domínio, os quais são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (VEERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

Assim, para a inserção do problema dentro do *software*, é necessário desenvolver a geometria da simulação e descrever uma malha (responsável por definir os elementos trabalhados no Fluent) para a mesma. O processo

tudo é realizado no Ansys Workbench, plataforma computacional que contém diversos programas de simulação computacional e ferramentas para elaboração de geometrias e malhas.

A simulação realizada é baseada no estudo de Zhang et al. (2010), onde os autores efetuaram um experimento em túnel de vento demonstrado na figura 1.

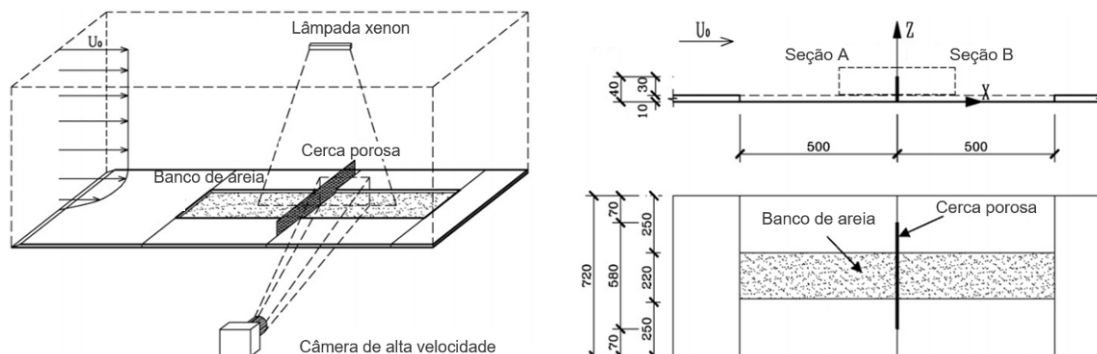


Figura 1: Representação da geometria de referência (adaptado de Zhang et al, 2010) indicando, respectivamente: a prática realizada pelos autores; e vistas lateral e superior dos planos coordenados

A partir do esquema, foi então possível a elaboração da geometria na ferramenta *Design Modeler*, para aplicação posterior no Fluent. Com as dimensões descritas na figura 1, foi possível desenhar no plano XY a região retangular que contém o banco de areia (720 mm x 1000 mm), o leito de areia (220 mm x 1000 mm) e a vista de topo da cerca porosa, cuja espessura foi extraída do artigo de referência (220 mm x 0,3 mm). Para a obtenção das dimensões verticais da geometria, utilizou-se o comando de extrusão do retângulo maior (adicionando material na direção normal em 300 mm – dimensão definida como altura do domínio computacional) para a criação da região atmosférica, e em seguida no *sketch* da *wind fence* (dessa vez cortando o material, também na direção normal, 30 mm a partir do *sketch*) para a criação da cerca. Nesta etapa, ainda não se define o banco de areia. O resultado gerado pode ser visto na figura 2.

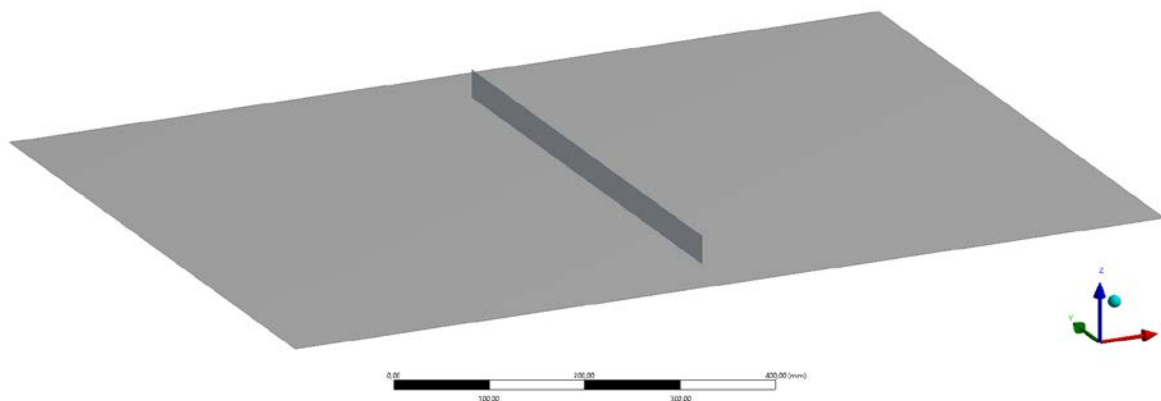


Figura 2: Representação da geometria do domínio do domínio computacional

A partir da geometria, na ferramenta Meshing foram definidas as *named selections* (regiões de contorno da simulação) bem como gerados os vários elementos a partir da malha definida com os parâmetros. Em *Sizing*, definiu-se o *Minimum Size* como 0,008 m e ambos *Maximum Sizes* como 0,010 m. Aplicou-se o comando *Inflation* para refinamento e estratificação da malha e se definiu o número máximo de camadas (*Maximum Layers*) como 5 e a taxa de crescimento (*Growth Rate*) como 1,2. A malha gerada pode ser vista na figura 3. Para obter-se uma malha ainda mais refinada próxima à *fence*, utilizou-se o comando *Adapt Region*, no Fluent, obtendo-se ao final um domínio com aproximadamente 5,4 milhões de elementos.

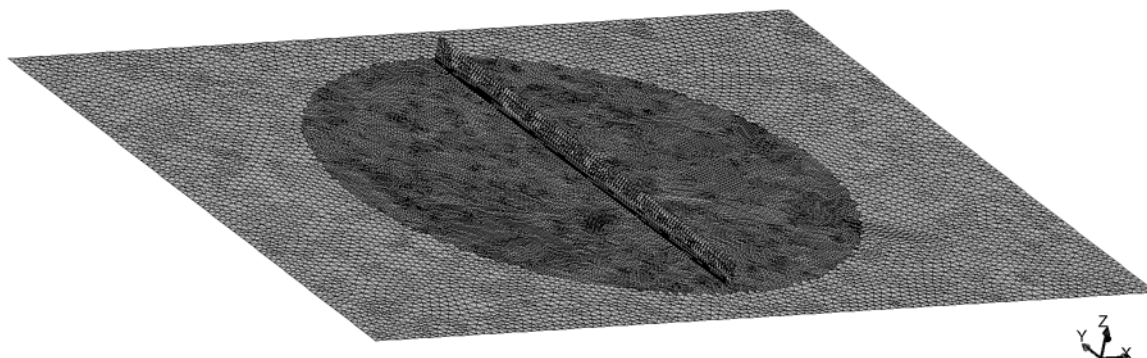


Figura 3: Representação da malha do domínio computacional com refinamento necessário próximo à barreira

As condições de contorno aplicadas para cada superfície são demonstradas na representação da figura 4. Considerou-se para o topo (*top*) e para as laterais do domínio (*left* e *right lateral wall*) a condição de simetria (*symmetry*), em que a geometria física de interesse e o padrão esperado da solução de fluxo têm simetria de espelho. A condição imposta à *wind fence* e ao chão, chamados de *wall* no esquema abaixo é a de não deslizamento (*no-slip*), a qual indica que o fluido se adere à parede e se move com a mesma velocidade dela que, no caso, é nula. Para a entrada do fluxo (*inlet*), insere-se os perfis de velocidade e energia cinética turbulenta, já para a saída do fluxo (*outlet*), define-se a condição de *outflow*, que indica ao Fluent a superfície de controle de saída de escoamento, a partir da qual não é necessário mais a computação – a simulação é definida para se iniciar no *inlet* e se encerrar no *outflow*, realizando a iteração do processo de resolução.

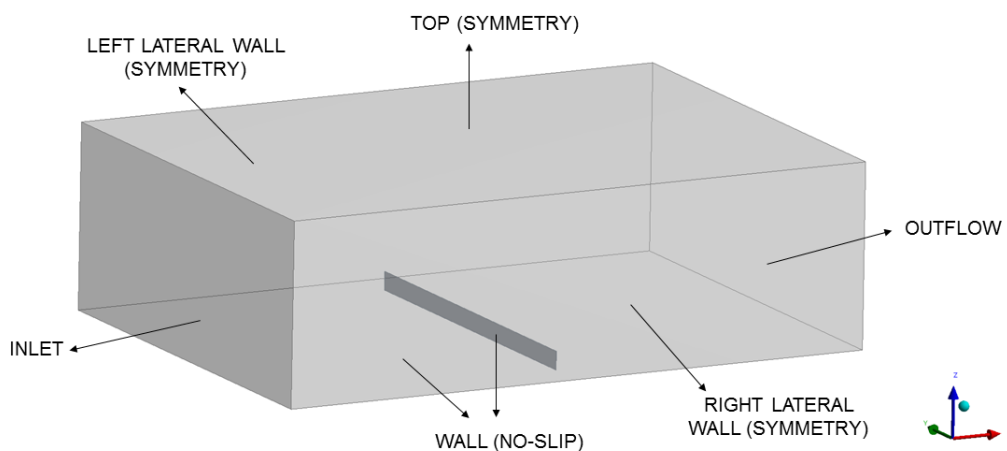


Figura 4: Condições de contorno

Feita a geometria e a malha, segue o processo para a etapa da preparação da simulação dentro do próprio Ansys Fluent. Nele, serão inseridos parâmetros físicos para a realização da simulação. O programa trabalha a partir da resolução iterativa de equações diferenciais que regem a Dinâmica de Fluidos de uma forma geral, como as Equações da Continuidade (conservação de massa, Equação 1), de Conservação da Quantidade de Movimento (Equação 2) e Conservação de Energia (Equação 3). A resolução por iteração se faz necessária devido à complexidade das simulações e conseqüente impossibilidade de solução analítica.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \text{equação (1)}$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad \text{equação (2)}$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{e} \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \rho Q_e \quad \text{equação (3)}$$

Onde ρ é a densidade do fluido, u é o vetor velocidade, σ é o tensor das tensões, e é a energia específica total, Q o termo fonte de energia específica, q é o fluxo de calor e t é o tempo (ANSONI, 2015).

As equações utilizadas no Fluent, no entanto, são versões adaptadas das anteriores. O programa realiza os cálculos a partir de equações RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), equações de Navier-Stokes para fluidos turbulentos e incompressíveis, que empregam valores esperados juntos de termos de variância ao longo de intervalos de tempo.

Observa-se que todas as fórmulas citadas derivam do Teorema de Transporte de Reynolds (UFPE, 2017), a partir do qual é possível escrever leis gerais de conservação. Supondo uma propriedade contínua N qualquer de um fluido, pode-se afirmar que a taxa de N variando com o tempo dentro de um volume de controle φ depende de quanto N é transportado para dentro e para fora do volume, através de fronteiras (superfícies de controle), e de quanto N é gerado ou consumido por fontes F no interior do volume. A equação 4 demonstra, em linguagem matemática, uma lei genérica de conservação:

$$\frac{d}{dt} \int_{\varphi} N d\varphi = - \int_{\varphi} (\mathbf{V} \cdot \mathbf{Nu}) d\varphi + \int_{\varphi} F d\varphi \quad \text{equação (4)}$$

Em que t é tempo e u a velocidade instantânea do fluido. Nota-se que o primeiro termo (à esquerda da igualdade) representa a variação de N por tempo dentro do volume de controle, o segundo indica a vazão da propriedade N pelas entradas/saídas do sistema, e o terceiro exibe a geração ou consumo de N pelo próprio sistema. As equações particulares podem então ser obtidas pela substituição da propriedade N por uma de interesse, seguido de manipulação algébrica e considerações físicas e/ou matemáticas.

No Fluent, definiu-se o banco de areia. O comando é responsável pela criação de uma nova região retangular dentro do plano XY, limitado às dimensões do leito de areia, onde serão inseridas as partículas nas etapas seguintes.

A porosidade da barreira, quando aplicável, será efetuada a partir da condição *Porous Jump*, usado para modelar membranas finas cujas propriedades de velocidade e queda de pressão são conhecidas. Esse comando simplifica a inserção de porosidade no programa para situações mais simples, onde certas interações físicas (por exemplo, transferência de calor) podem ser desconsideradas (FLUENT INC, 2017). A definição de *Porous Jump* usa da equação 5 para os cálculos de porosidade:

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad \text{equação (5)}$$

Que é uma adaptação da Lei de Darcy com termos adicionais para consideração de perdas inerciais, onde μ é a viscosidade laminar do fluido, α é a permeabilidade do meio, C_2 é o coeficiente de salto de pressão, v é a velocidade normal à face porosa, Δp é o delta de pressão e Δm é a espessura do meio. Os valores para α e C_2 foram calculados, utilizados como $1,5552 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ e $10502,40055 \text{ 1/m}$, respectivamente. Δm foi definido como 0,3 mm por ser a espessura da cerca porosa.

Fez-se injeção de partículas na região retangular predefinida, para representar o leito de areia na simulação. Considerou-se particulado esférico, com 250 μm de diâmetro uniforme e densidade de 2650 kg/m^3 . O programa utiliza um modelo de fases discretas (*Discrete Phase Model - DPM*) para o cálculo de interações entre a fase contínua e o particulado, e interações partícula-partícula caso desejado (que, para simplificação deste estudo, não foram consideradas). O DPM computa a trajetória de cada partícula injetada a partir de análises em espaços de tempo de balanços de força.

Os parâmetros necessários para a inserção do particulado no domínio inclui a densidade da partícula, o tempo total em que as partículas são inseridas no domínio, a direção de injeção das mesmas e o fluxo de massa. Para o controle de partícula não-estável (*Unsteady Particle Tracking*), o tempo de início da injeção e o tempo de parada devem ser especificados. O particulado foi, portanto, definido como inerte, por ser característica do material simulado, e a direção de injeção das partículas foi perpendicular à área de inserção, com *stop time* de 0,5 segundos. O fluxo de massa (*Total Flow Rate*), definido em 10 kg/s , foi inserido ao processamento considerando a velocidade nula das partículas, e o modo de injeção selecionado foi o de *Surface*, para que fosse possível a seleção do plano mencionada.

O modelo de turbulência selecionado para a simulação foi o modelo $k-\varepsilon$, que consiste na determinação da viscosidade turbulenta do fluido a partir de entradas da energia cinética turbulenta (k) e da dissipação dessa mesma energia (ε). Nesse modelo, as escalas de comprimento e tempo tem formulação por meio da energia cinética e dissipação de turbilhões. A partir da inserção do perfil $k-\varepsilon$ descrito pelo artigo de referência, o programa foi capaz de interpolar as equações regentes desse sistema.

O mesmo processo de inserção foi utilizado para a determinação do perfil de velocidade na entrada. Criou-se um perfil de velocidade utilizando dados do estudo, deixando com que o *software* interpole a função, que se aproxima de um perfil parabólico. Então, relacionou-se o perfil criado com a superfície nomeada *inlet*, região a partir da qual o programa inicia a simulação.

O *solver* utilizado foi o SIMPLEC (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent*), algoritmo bastante aplicado em CFD para resolução das equações de Navier-Stokes. Trata-se de um código derivado do SIMPLE, outro algoritmo de mesma função, com pequenas alterações para prevenir o descarte de pequenos valores de velocidade. Tais algoritmos trabalham pela iteração de equações envolvendo pressão a partir de valores estimados inicialmente, com termos de correção e valores corrigidos. O SIMPLEC para quando há convergência das equações de transporte para um determinado valor – caso contrário, os valores corrigidos iniciam o ciclo de resolução seguinte como sendo estimativas.

Ao longo do estudo apresentado neste artigo foram simuladas duas situações, para a observação de diferentes fenômenos. Na primeira situação, verificou-se o escoamento em torno da barreira sem interferência de efeitos de porosidade e sem injeção de partículas. No segundo caso, já com injeção do particulado, verificou-se a influência da barreira sob a concentração das partículas, antes e depois da mesma.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões do presente artigo estão divididos em duas partes principais: (i) distribuição de velocidade e vetores velocidade em plano vertical e longitudinal no centro do domínio computacional ao redor de uma barreira sólida e (ii) avaliação da dinâmica das partículas erodidas pela ação do vento incidente.

Após a primeira simulação, foi possível verificar o gradiente de velocidade ao longo do domínio, conforme figura 5, a qual apresenta o perfil da magnitude da velocidade normalizado (U/U_{\max}) na direção do escoamento, sendo U_{\max} aproximadamente 7,3 m/s. Neste teste não houve injeção de particulado na superfície inferior do túnel de vento. Analisando na direção do escoamento, observa-se pelas linhas de contorno perda brusca de velocidade média nas regiões próximas a cerca onde o vento incide. Após a barreira, surge um diferencial de velocidade do vento, que ocasiona na formação de zonas de recirculação e de baixa pressão. A formação dessas zonas evitaria a ascensão de particulados a serem carregados pelo vento, caso ali existissem. Nota-se que há uma aceleração do fluido na região acima da barreira, ocasionada pelo obstáculo ao escoamento, fazendo com que haja uma retração inicial da velocidade instantânea na região a montante, sendo acelerada à medida que se ultrapassa a camada limite de escoamento. Portanto o vento tende a retomar velocidade conforme se distancia da cerca, até que não haja mais influência da mesma.

Na figura 6, o gráfico dos vetores evidencia a região de recirculação após a barreira, que apresenta uma estrutura de vórtice dominante, a qual induz uma zona de baixa velocidade, conforme indicam os contornos anteriores. A porosidade irá provavelmente modificar os padrões do escoamento bem próximo à barreira, porém, já é possível identificar os principais parâmetros que irão diretamente influenciar a dinâmica da erosão de pilhas de estocagem de material granulado. Uma barreira sólida tem dificuldades construtivas associadas, bem como um alto custo. Estas barreiras sólidas funcionariam praticamente como um enclausuramento das fontes, dificultando, dentre outros fatores, a manipulação dos materiais granulosos. Os pátios de materiais granulosos são muito extensos requisitando um estudo avançado da construção civil necessária para instalar tais barreiras.

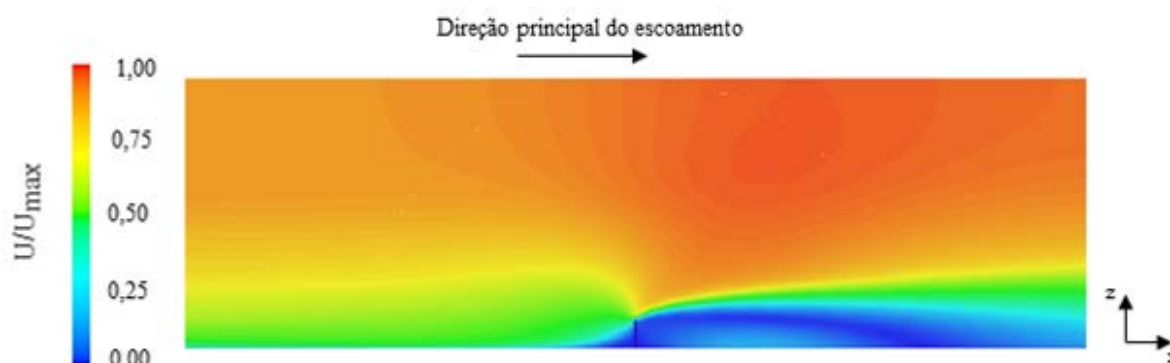


Figura 5: Linhas de contorno da velocidade média do escoamento

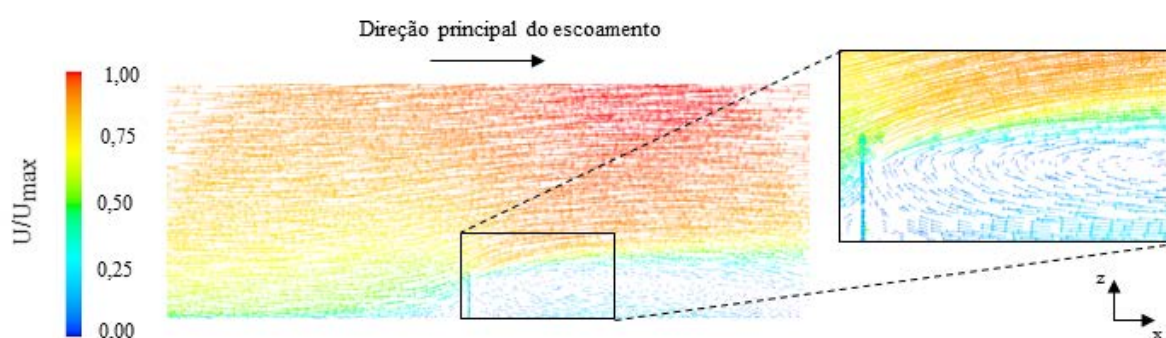


Figura 6: Vetores de velocidade média ao longo do escoamento

As figuras 7 e 8 representam a segunda simulação realizada no presente estudo. Nesta foram inseridas as partículas nos leitos. Os leitos então sob erosão do escoamento de vento turbulento são intensamente modificados e a barreira ocasiona a identificação de regiões bem características do escoamento e da dinâmica das partículas. Na figura 7 está apresentada a distribuição, no plano vertical e longitudinal no centro do domínio, da magnitude da velocidade das partículas. A barreira sólida está representada pela linha preta no centro inferior da imagem. Nota-se na imagem a formação de uma esfera ao redor do centro do domínio computacional. Isto é um efeito do refinamento da malha na visualização dos resultados no *software* específico.

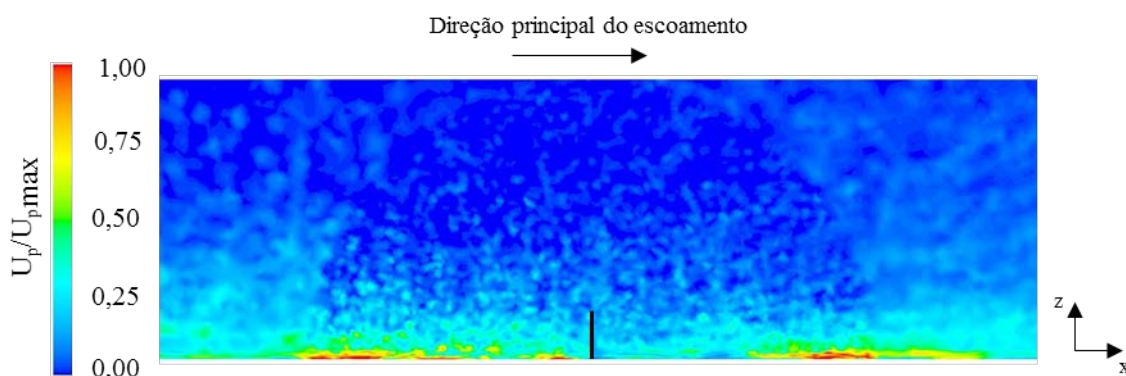


Figura 7: Distribuição de velocidade das partículas erodidas dos leitos de partículas

É claramente identificável a redução da velocidade média das partículas principalmente a jusante da barreira. Um aumento da altura da barreira ocasionaria uma ainda maior zona de recirculação e maior proteção da superfície. Esta altura deve ser função direta do objeto a ser protegido. Deve-se evitar obrigatoriamente que as fontes difusas (pilhas de estocagem) se situem na região de recolamento do escoamento a jusante das barreiras. Nestas regiões o escoamento é acelerado e pode provocar um aumento excessivo das emissões.

O movimento das partículas erodidas pelo vento através de uma cerca porosa é complexo e difícil de ser estudado, pois o vento incidente não simplesmente reduz de velocidade após a passagem, mas cria uma interação com camadas de vento adjacentes, o que leva ao aparecimento de zonas de recirculação na interface entre a camada de vento passante e a imediatamente acima. Nessa região, a trajetória das partículas de areia é bastante alterada.

A figura 8 é complementar a figura 7. A distribuição apresentada é agora da concentração das partículas. Nota-se uma concentração maior das partículas na região a jusante próxima à barreira. Nas demais regiões, bem próximas ao solo a distribuição de concentração de partículas é bem similar a montante e a jusante da barreira.

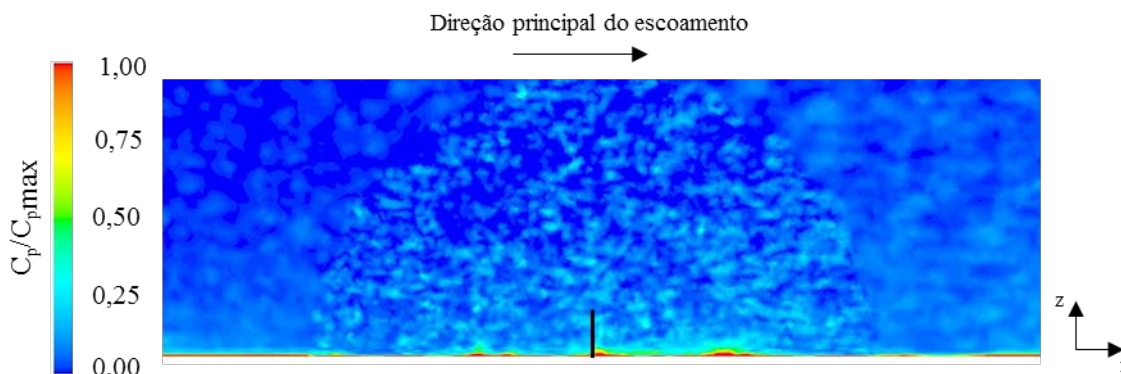


Figura 8: Distribuição de concentração das partículas em um plano vertical e longitudinal no centro do domínio computacional

CONCLUSÕES

As *wind fences* atuam como barreiras artificiais para reduzir a velocidade do vento incidente, as quais exercem uma força de arrasto no campo de vento, ocasionando perda de momento no fluxo e gerando um certo nível de proteção às partículas abrigadas pela cerca. Esses dispositivos possuem um campo de aplicação prática mais vasto do que outros métodos de proteção, como os quebra-ventos de vegetação (cinturão verde), pois podem ser instaladas independentemente do ambiente ao redor, como em ambientes marinhos, onde não é possível aplicação do cinturão verde.

Os resultados do presente estudo mostram que a barreira reduz o momento das partículas erodidas pelo vento incidente, a partir da geração de áreas turbulentas; ocorre queda na taxa de transporte e energia cinética após a passagem do escoamento pela cerca; e a concentração de material particulado decresce após a *wind fence*, redução percebida de forma drástica em pontos próximos à barreira. Dessa maneira, foi possível avaliar a eficiência da cerca no que tange à redução dos efeitos erosivos em materiais particulados e, conseqüentemente, validar sua aplicação em pátios de estocagem como forma de proteção (abrigo) de matéria-prima e diminuição da poluição ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSONI, J. L. Metodologia para projeto de biorreatores industriais via otimização multiobjectivo com base em parâmetros de desempenho calculados por técnicas de CFD. Tese (Doutorado) EESC-USP, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.
2. CTG, DEMEC - UFPE. Análise integral de volumes de controle. Disponível em <<https://www.ufpe.br/ldpflu/capitulo4.pdf>>. Acesso em 12 mai. 2017.
3. FLUENT INC. *Porous Jump Boundary Conditions*. Disponível em <<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node288.htm>>. Acesso em 19 mai. 2017.
4. LEE, S., KI, C. W. *Wind tunnel observation about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements. Atmospheric Environment*, v. 36, n. 9, p. 1453-1463, 2002.
5. LEUNG, A. Y. T., BOGODAGE, S. G. *CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution. Powder Technology*, v. 286, p. 488-506, 2015.
6. MOHAJER, N. A., TORKIAN, A. *Diffuse Emissions of Particles from Iron Ore Piles by Wind Erosion*.

- Environmental Engineering Science*, v. 28, n. 5, p. 333-329, 2011.
7. SADA, K., SATO, A. *Numerical calculation of flow and stack-gas concentration fluctuation around a cubical building*. *Atmospheric Environment*, v. 36, n. 35, p. 5527-5534, 2002.
 8. SANTOS, J. M., REIS JR, N. C., GOULART, E. V., MAVROIDS, I. *Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification*. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 34, p. 5484-5492, 2009.
 9. SHERMAN, J. D., LI, B. *Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review*. *Aeolian Research*, v. 17, p. 33-48, 2015.
 10. SHI, F. S., XI, P., WU, J. J. *A lattice Boltzmann-Saltation model and its simulation of aeolian saltation at porous fences*. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, v. 29, n. 1, p. 1-20, 2015.
 11. VEERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume method*. 2 ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007. 503 p.
 12. ZHANG, N., KANG, J. H., LEE, S. J. *Wind tunnel observation on the effect of a porous wind fence on shelter of saltating sand particles*. *Geomorphology*, v. 120, n. 3-4, p. 224-232, 2010.