

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM MODELOS FLORESTAIS

Luciano Gonçalves Noletto

lucianonoleto@unb.br

Casimiro Cala

Aldo João de Sousa

aldo@unb.br

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, CEP 70910-900, Brasília-DF

brasiljr@unb.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é o estudo numérico e experimental do escoamento turbulento em modelos florestais caracterizados através de modelos físicos simples. O modelo em questão é o de uma matriz de cilindros. Objetiva-se aqui o entendimento deste tipo de escoamento. Para a experimentação, anemometria de fio quente em um túnel de vento foi utilizada. Para a simulação numérica, a técnica URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) foi utilizada, através do modelo de turbulência SST. Os resultados foram obtidos com o código ANSYS CFX. Os resultados denotaram a típica forma de camada limite inerente a este escoamento. Notou-se nos resultados a formação de estruturas coerentes nas esteiras a montante da matriz. Estas esteiras influenciam a esteira dos cilindros mais a jusante.

Palavras-chave: Escoamentos Florestais, Experimentação em Túnel de Vento, Modelagem de Turbulência.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de escoamentos atmosféricos em cidades e florestas (*canopy flow*, do inglês) transcende o campo da turbulência. Seus efeitos nas florestas é objeto de estudo não apenas na engenharia e na física aplicada, mas para a meteorologia, agricultura, queimadas em florestas, dispersão de poluentes, biologia e hidrologia. O estudo do escoamento turbulento neste caso tem origens empíricas. A difusão de gases e de poluentes neste escoamento ocorre devido às difusões molecular e turbulenta e efeitos de sedimentação. O seu modelamento necessita de termos adicionais nas equações de Navier-Stokes, e cuidados especiais na formulação do problema, devido às peculiaridades do ambiente florestal como material de superfície artificial, fontes antropogênicas de calor e água, e a presença de obstáculos de formatos variados. Os efeitos imediatos na turbulência ocorrem na difusão e na convecção neste regime. O estudo deste pode ser feito através de experimentação *in situ*, experimentação em túnel de vento e simulação numérica. Para este último, são utilizados modelos de turbulência modificados e simulação de grandes escalas.

A utilização de cilindros para a aproximação do escoamento mostra-se vagamente análoga aos casos em questão. Entretanto, esta aproximação é boa para uma avaliação inicial. Além disto, o estudo de apenas um cilindro é bem representativo do problema de escoamentos urbanos e de problemas de interação fluido-estrutura. Pode-se encontrar na literatura vários problemas desta natureza (Cala (1996), Seginer et al. (1976)). Para o caso do escoamento em florestas, a aproximação dos elementos florestais mais simples por cilindros objetiva estudar os efeitos de arrasto oriundos da interação ar-floresta.

Tratando de escoamentos florestais, Miguel et al. (2001), estudou uma abordagem para estudar o escoamento de ar em espaços fechados, desenvolvendo a equação de quantidade de movimento em termos do método de média volumétrica, obtendo uma equação diferencial não linear passível de resolução numérica, e com uma abordagem unidimensional, obteve-se uma boa aproximação com a realidade. Finnigan (2000) fez um estudo detalhado da turbulência em escoamentos em florestas, concluindo que este tipo de escoamentos possui uma gama de peculiaridades que inviabilizou o estudo deste escoamento por modelos baseados na difusividade da escala turbulenta. Lien et al. (2005), estudou a formulação matemática de uma modificação do modelo $k-\epsilon$, específica para o caso de escoamentos atmosféricos, concluindo que a tomada de média espacial e temporal das equações do modelo levam a uma parametrização da energia cinética de turbulência. Patton (1997) estudou em sua tese de doutorado uma versão modificada da simulação de grandes escalas para incluir os efeitos aerodinâmicos e termodinâmicos dos elementos geradores de arrasto. Seu objetivo é investigar a interação destes elementos com a camada limite atmosférica. Seus resultados denotaram um retardamento no redesenvolvimento da turbulência após o obstáculo. Seus resultados de energia cinética de turbulência média, pressão, na forma média e flutuações mostraram razoável concordância com resultados experimentais. Novak et al. (2000) fizeram medições em túnel de vento de escoamentos em florestas, utilizando modelos em escala reduzida, e compararam com medições em florestas na Escócia. Seus resultados mostraram estar de acordo com o que se esperava deste escoamento. Cala (1996) estudou um modelo florestal baseado em uma matriz de cilindros pendulares através de experimentação em túnel de vento. Os perfis levantados mostraram boa comparação com trabalhos similares.

Este trabalho estudará escoamentos florestais através da aproximação por um modelo baseado em uma matriz de cilindros. Este estudo será feito através de experimentação e de simulação numérica. Para a experimentação, utilizou-se anemometria de fio quente em um túnel de vento. Para a simulação numérica, utilizou-se o código ANSYS CFX e o modelo de turbulência SST simulado através da técnica URANS.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Túnel de Vento e Aparato Experimental

Todos os experimentos deste trabalho foram desenvolvidos em um túnel de vento aerodinâmico de seção de trabalho de 650x650 mm e 3600 mm de comprimento. O túnel de vento permite uma velocidade de trabalho máxima de 25 m/s (Figura 1). O escoamento é gerado por um ventilador axial de 40 CV instalado em uma caixa de 4 m³. O motor elétrico do ventilador tem um controle eletrônico de velocidade que permite a operação de diferentes velocidades. A entrada do túnel é feita de um bocal convergente, de modo a obter uma intensidade de turbulência de 0,5%. Uma placa plana é posicionada a 100 mm da parede superior, servindo de base para a matriz de cilindros. Em seu bordo de ataque, foi feito um chanfro de 45 graus. 88 cilindros de alumínio de 75 mm de altura e 9 mm de diâmetro foram posicionados em arranjo defasado a 450 mm do bordo de ataque. O espaço entre cilindros é de 75 mm. Todos os cilindros são ocos e foram preenchidos com pesos de aço de modo a se evitar qualquer movimento pendular dos cilindros.

2.2. Perfil de camada limite

A caracterização do escoamento de camada limite a montante da matriz foi feita através de uma criteriosa medição do perfil de velocidade e de intensidade de turbulência em várias posições. Para este caso, um instrumento ótico de medição da posição (Um catetômetro marca Gaertner M-912 com resolução de 0.01 mm). Com isto, o perfil de velocidade foi medido e aproximado por uma função de expoente 1/6, denotado por:

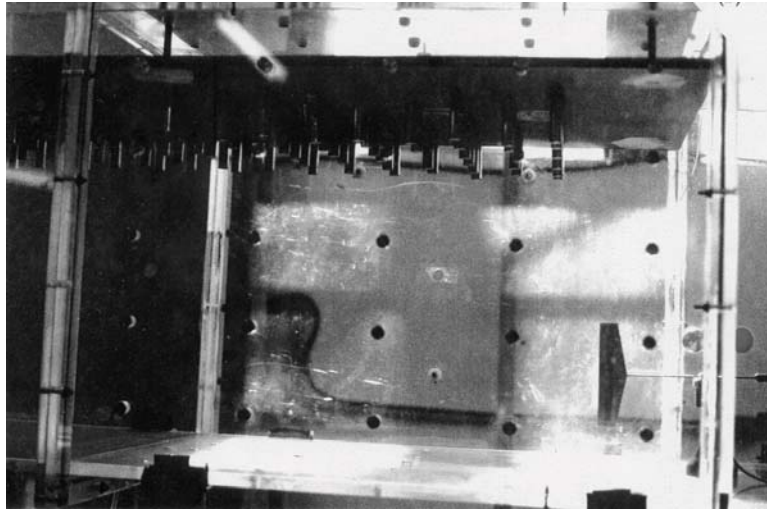


Figura 1: Visualização da seção de trabalho

$$\frac{u}{u_0} = 1,089 \left(\frac{z}{H} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (1)$$

onde u_0 é a velocidade do escoamento não perturbado, H é a altura do cilindro e z é a coordenada axial do escoamento. Este perfil também foi utilizado como condição de entrada na simulação numérica.

2.2. Medição de Velocidade

Para a medição de velocidade um anemômetro de fio quente marca DISA 55D01 (Figura 2) combinado com um voltímetro digital e uma unidade de medida RMS foi utilizada. Os dados foram transferidos para um computador através de uma interface digital HP-IB. As medidas foram feitas com sondas unidirecionais DISA feitas de tungstênio. Tais sondas têm um diâmetro de $5 \mu\text{m}$. As sondas foram colocadas em um aparato que permite um movimento vertical de 10^{-1} mm da sonda. Este aparato é feito de modo a permitir a calibração do anemômetro no próprio túnel de vento, após cada rodada de medições. Um tubo de Pitot foi anexado a um micro-manômetro de modo a permitir a medição de pressão diferencial. A velocidade foi medida a jusante de um cilindro base da matriz. Para esta medida, a sonda foi colocada na base do túnel e deslocada a um passo de 2 mm . As medidas começaram a ser tomadas em 5 mm da base da matriz até 60 mm fora da matriz. O número de Reynolds considerado foi de 21000 .

3. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

As equações de Navier-Stokes podem, através de um processo de média temporal, resolver escoamentos turbulentos. Este processo é chamado de decomposição de Reynolds. As equações médias assumem a seguinte forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

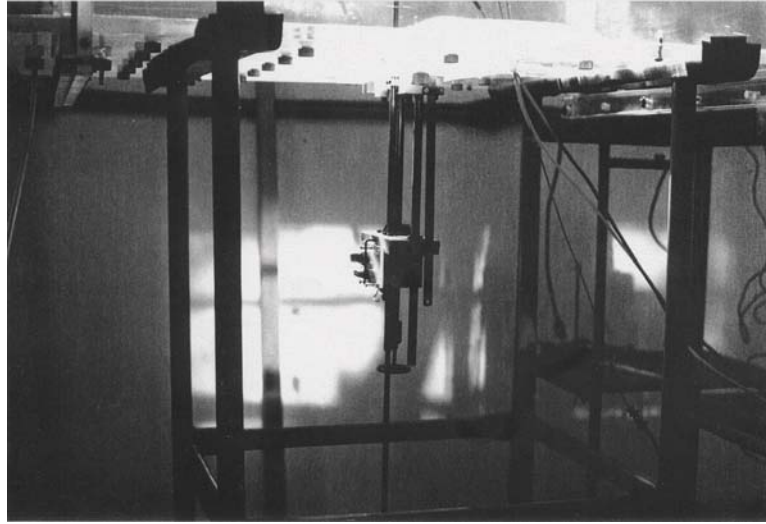


Figura 2: Visualização do anemômetro

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

Nestas equações, u_i e p são a velocidade e a pressão, μ e ρ a viscosidade e massa específica do fluido e μ_T é a viscosidade turbulenta.

3.1. Modelo de Turbulência SST

O modelo SST remete a Menter (2003) e seu princípio consiste em uma utilização simultânea dos modelos de turbulência $k-\varepsilon$ e $k-\omega$. Longe da parede, utiliza-se o modelo $k-\varepsilon$, e perto da parede, utiliza-se o modelo $k-\omega$. As equações de transporte são denotadas por:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta' \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

k é a energia cinética de turbulência e ω é a frequência turbulenta. A viscosidade turbulenta é definida por:

$$\mu_T = \frac{a_1 k \rho}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (6)$$

S é uma medida invariante do tensor taxa de deformação e F_2 é uma das duas funções de mistura do modelo. A formulação das funções de mistura F_1 e F_2 é baseada na distância até a parede e nas variáveis do escoamento. Logo, F_1 e F_2 são denotadas por:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (7)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \quad (8)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (9)$$

F_1 é igual a zero longe da parede (modelo k- ϵ), e muda para 1 no interior da camada limite (modelo k- ω). F_2 é denotada por:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (10)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (11)$$

Um limitador de produção P_k é utilizado para evitar o crescimento da turbulência em regiões de estagnação:

$$P_k = \mu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\tilde{P}_k = \max(P_k, 10 \cdot \rho \beta k \omega) \quad (13)$$

As constantes do modelo são contabilizadas como uma síntese das constantes dos modelos k- ϵ e k- ω através da seguinte função:

$$\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F) + \dots \quad (14)$$

As constantes são $\beta'=0.09$, $\alpha_1=5/9$, $\beta_1=3/40$, $\sigma_{k1}=0.5$, $\sigma_{\omega 1}=0.5$, $\alpha_2=0.44$, $\beta_2=0.0828$, $\sigma_{k2}=1$, $\sigma_{\omega 2}=0.856$. As expressões analíticas para ω fornecidas pelas equações dos modelos com esta variável permitem uma formulação próxima à parede. Esta muda gradualmente de funções de parede para formulações de baixo número de Reynolds próximo a parede.

4. CONDIÇÕES DE CONTORNO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

Em condições de entrada ou afluxo, sobre a superfície que representa a condição de contorno, são impostas condições de contorno de Dirichlet para a velocidade e para as grandezas turbulentas. Ou seja, os valores de velocidade, energia cinética de turbulência e de dissipação turbulenta foram impostos.

Em condições de saída, sobre a superfície que representa a condição de contorno, são impostas condições de Neumann homogêneas sobre as componentes do campo de velocidade e sobre as grandezas turbulentas. É considerada uma pressão de referência na saída através de uma condição de Dirichlet. A matriz de cilindros deste trabalho é considerada desprovida de movimento pendular e presa a sua base, de forma a reproduzir fielmente as condições experimentais. O domínio computacional possui as mesmas medidas da seção de teste do túnel de vento (seção 2.1). Para a condição de entrada, utilizou-se o perfil de camada limite mostrado na seção 2.2. Utilizou-se a condição de interface de par periódico para a simulação. Com isto, apenas a sexta parte do domínio foi utilizada.

A figura 3 denota as malhas utilizadas. Inseriu-se um refinamento na região da subcamada rugosa do escoamento. Logo a malha tem 185420 nós e 1034325 elementos. As condições iniciais foram de valores nulos para todas as grandezas. A simulação foi conduzida em regime transiente com um passo de tempo de 10^{-3} segundos com um tempo total de 100 segundos. O critério de convergência foi imposto como 10^{-4} para todos os campos em questão.

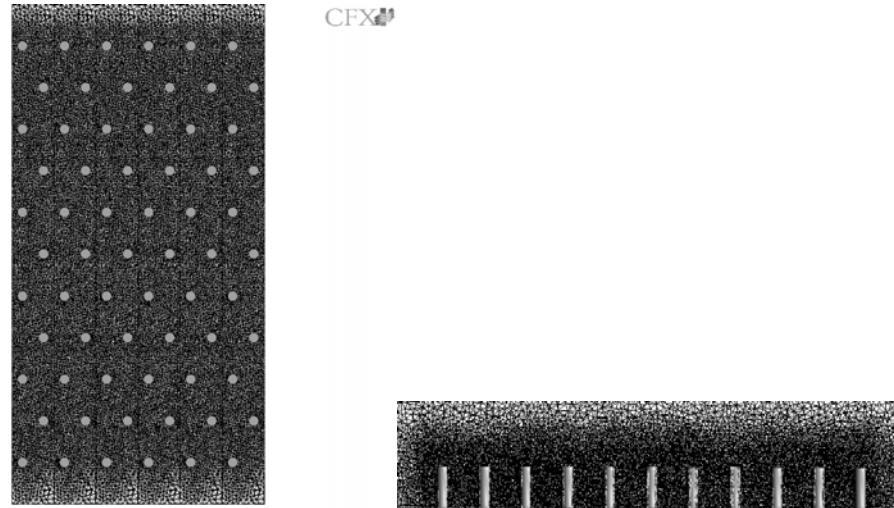


Figura 3: Malha de Cálculo

5. RESULTADOS

A Figura 4 denota os resultados simulados para a matriz de cilindros em uma vista de lado. As isosuperfícies de velocidade e as linhas de corrente tridimensionais mostram as semelhanças deste escoamento com a camada rugosa. As isosuperfícies mostram que os setores de baixa velocidade se localizam em todas as extensões da matriz. Os setores de velocidades mais altas se localizam apenas mais a montante da matriz. Na terceira e quarta fileira da matriz, as isosuperfícies apresentam movimento ascendente, configurando atípica visualização de uma camada limite em uma placa plana. Este acréscimo de velocidade denota não apenas o padrão da camada limite, mas também a interação entre a mesma e o escoamento não perturbado. As linhas de corrente tridimensionais evidenciam a tridimensionalidade do escoamento. Observa-se a influência dos cilindros nas vizinhanças da esteira dos cilindros à frente. É nesta região que fenômenos como arrasto, transporte de quantidade de movimento, e, quando for o caso, transporte de calor e massa são maximizados. A Figura 5 mostra uma vista de topo e isométrica da matriz. Os contornos de velocidade plotados em um plano paralelo e próximo a parede do chão, juntamente com as isosuperfícies de velocidade, mostram a esteira turbulenta gerada pela matriz. Nota-se a formação e emissão de estruturas coerentes, de forma mais evidente do que os resultados para um cilindro. No caso de apenas um cilindro, a emissão no escoamento médio era inibida pelos efeitos de ponta somados com os vórtices ferradura formados no chão. Pode-se admitir que a presença de outros cilindros iniba os efeitos de topo na esteira dos cilindros, o que permite a formação de estruturas coerentes. Uma prova desta suposição reside no fato de que a esteira se torna mais evidente nos cilindros localizados na segunda e terceira fileiras da matriz. Observa-se que os dois primeiros cilindros a montante apresentam linhas que denotam circulação no seu topo. Este efeito desaparece nos demais cilindros. Nota-se que as esteiras formadas nas fileiras a montante influenciam significativamente as esteiras dos cilindros a jusante (Figura 5). Percebe-se que, na sexta fileira a esteira se aproxima da simetria entre vórtices, mas ao continuar à jusante, a emissão de estruturas coerentes volta a acontecer.

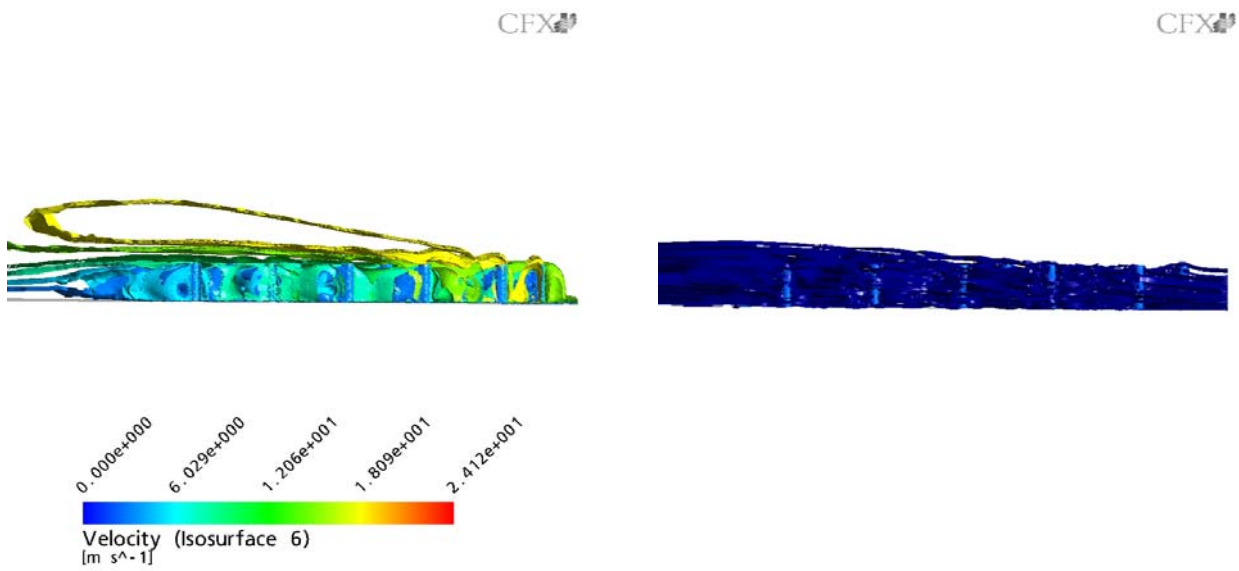


Figura 4: Visualizações de velocidade em uma vista de lado

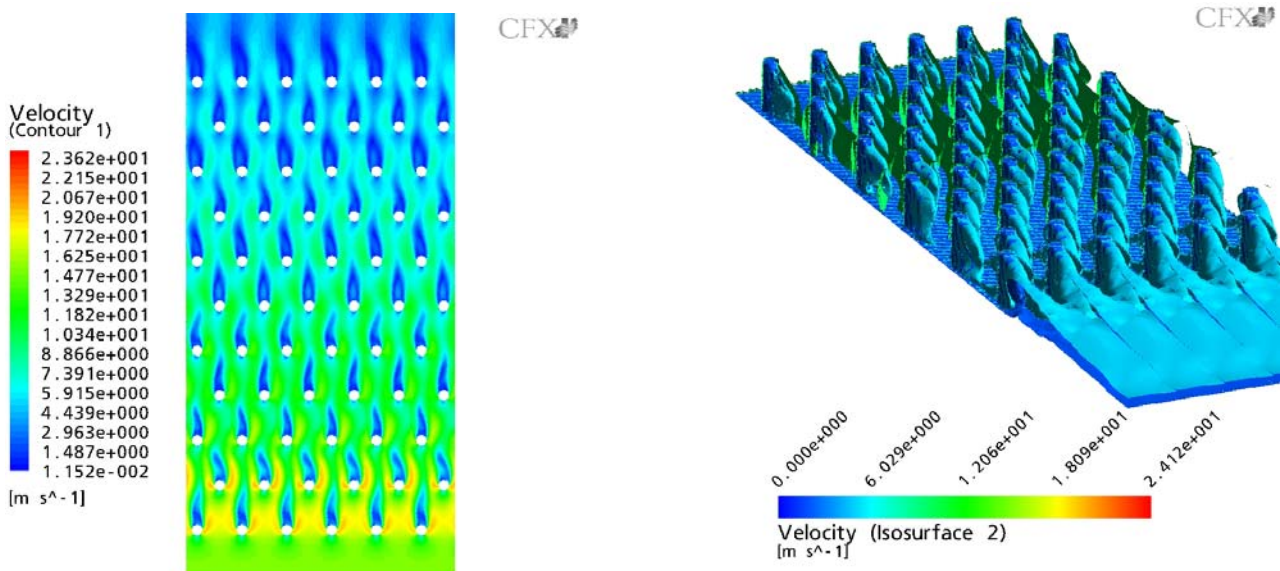


Figura 5: Visualizações de velocidade em uma vista isométrica

Pode-se afirmar que esta esteira próxima ao solo da matriz é responsável pela conversão de energia cinética média em energia cinética de turbulência, a uma escala característica dos elementos da matriz. As linhas de corrente de superfície mostram a configuração dos vórtices assimétricos na esteira. Nota-se que, mesmo na sexta fileira, onde não há uma emissão vórtica, a esteira desta fileira apresenta assimetria.

Os perfis simulados de velocidade na matriz são mostrados na Figura 6 e Figura 7, juntamente com os resultados experimentais obtidos. Os perfis de velocidade foram tomados a partir de um cilindro base localizado na antepenúltima fileira de baixo para cima, sendo este cilindro o terceiro da direita para a esquerda na figura 5, nas posições de 4, 6 e 8 diâmetros na direção axial do escoamento. Para a faixa do número de Reynolds do caso em questão, um leve decréscimo da velocidade é observado. Isto se deve a alta velocidade decorrente do alto Reynolds. Portanto, para superar os efeitos de arrasto, é necessária uma alta quantidade de energia cinética média. Esta alta velocidade pode inibir qualquer escoamento ascendente. Os resultados não mostram diferenças significativas entre os perfis. A velocidade se mostra constante e de menor valor quando comparada com a velocidade do escoamento livre. Isto ocorre devido ao decréscimo da velocidade no interior da matriz. Na altura de $2/3$ da altura da matriz, a velocidade começa a aumentar. Os efeitos de topo a jusante da matriz acabam por afetar o escoamento, conforme visto em Seginer et al. (1976). Nota-se que os perfis tanto numéricos quanto experimentais guardam semelhança com os perfis medidos em florestas por Katul et al. (2004). Neste trabalho, os autores mostraram perfis numéricos e experimentais de vários tipos de florestas. Nota-se que os perfis de velocidade relativos à 4D mostram-se semelhantes aos perfis medidos para plantações de arroz e milho, apresentando inclusive a inflexão para o topo da matriz. Os perfis de velocidade relativos à 6D mostram-se parecidos com os perfis medidos para uma floresta de pinhos. Todos os perfis mostraram semelhanças para os perfis medidos em florestas boreais. Os perfis numéricos mostram boa concordância com a experimentação. Nota-se que todos os perfis numéricos mostraram inflexão, e nos resultados experimentais, apenas o perfil localizado em 4D. Isto significa que a simulação subestimou, com pouca diferença, os efeitos de camada limite. Conseqüentemente, como os perfis foram adimensionalizados pela velocidade no topo da matriz, pode-se afirmar que os resultados simulados mostram uma camada limite estreita quando comparada com a camada limite medida experimentalmente. Cabe ressaltar que a matriz utilizada pelo presente trabalho possui menor densidade, quando comparada com Seginer et al. (1976). De fato, os perfis tanto experimentais quanto numéricos mostram menor desaceleração. Os resultados simulados se mostram similares aos resultados experimentais.

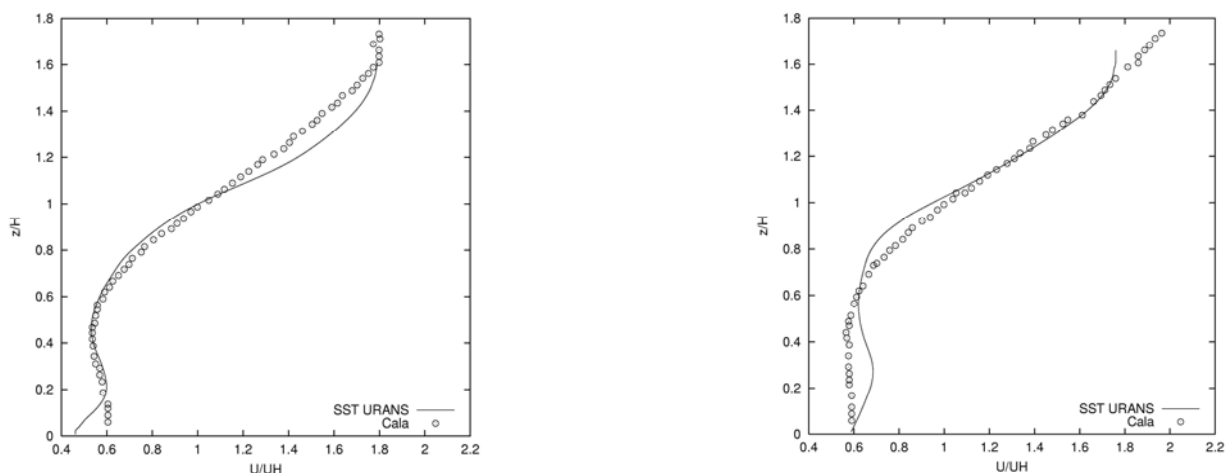


Figura 6: Perfis de velocidade em 4D (esquerda) e 6D (direita)

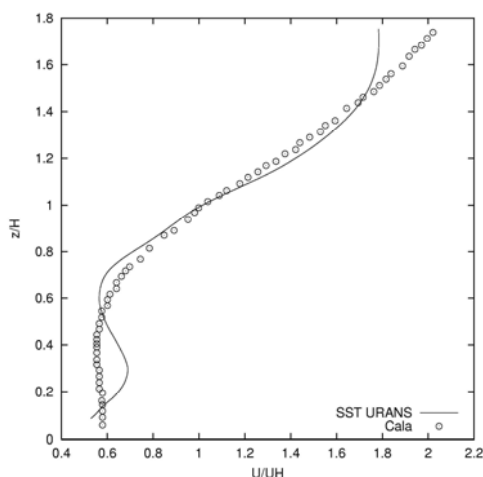


Figura 7: Perfis de velocidade em 8D

7. CONCLUSÕES

Resultados da simulação numérica e da experimentação em um modelo florestal baseado em uma matriz de cilindros foram apresentados. A visualização dos resultados numéricos mostra o típico padrão de camada limite deste tipo de escoamento. As visualizações de lado mostram a interação entre os cilindros e a camada limite. Notou-se a presença da emissão de estruturas coerentes na matriz, e como esta emissão influencia a esteira dos cilindros mais a jusante. Os resultados experimentais são mostrados na forma de perfis de velocidade. Estes resultados mostram o crescimento da velocidade perto do topo dos cilindros, que concorda com resultados anteriores. Os perfis numéricos denotam proximidade com os resultados experimentais. A diferença está no fato de que os perfis numéricos previram inflexões em lugares próximos dos resultados experimentais. Os resultados de média espacial mostram quais seriam as zonas onde os resultados não sejam mascarados por intensas flutuações.

Concluindo, os resultados podem ser considerados como satisfatórios. Os resultados experimentais mostraram padrões observados em outros trabalhos na literatura. Os resultados numéricos mostraram-se de acordo com a experimentação. Considera-se para um trabalho futuro a simulação com metodologias de grandes escalas, e uma discussão mais aprofundada sobre o processo de média espacial.

4. REFERÊNCIAS

- Cala, C. E. C., 1996, Estudo do Escoamento Turbulento Dentro e Sobre uma Matriz de Cilindros Pendulares, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, DM-018.
- Finnigan, J. J., 2000, Turbulence in plant canopies, “Annual Review of Fluid Mechanics”, Vol. 32, pp. 519–571.
- Katul, G. G., Mahrt, L., Poggi, D., e Sanz, C. (2004). One And Two-Equation Models For Canopy Turbulence. “Boundary Layer Metereology” 113, 81–119.
- Lien, F., Yee, E., e Wilson, J. D. (2005). Numerical Modelling Of The Turbulent Flow Developing Within And Over A 3-D Building Array, Part II: A Mathematical Foundation For A Distributed Drag Force Approach. Boundary Layer Metereology 114, 245–285.

- Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., 2003, Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, “Turbulence, heat and Mass transfer”, Vol. 4.
- Miguel, A., de Braak, N., Silva, A., and Bot, G., 2001, Wind-induced air flow through permeable materials, “Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics”, Vol. 89, pp. 45–57.
- Novak, M. D., Warland, J. S., Orchansky, A. L., Kettler, R., and Green, S., 2000, Wind Tunnel and Field Measurements of Turbulent Flow in Forests part 1: Uniformly thinned Stands, “Boundary Layer Meteorology”, Vol. 95, pp. 457–495.
- Patton, E. G., 1997, “Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Above and Within a Plant Canopy”, PhD thesis, University of California.
- Seginer, I., Mulhearn, P. J., Bradley, E. F., and Finnigan, J. J., 1976, Turbulent flow in a model plant canopy, “Boundary Layer Meteorology”, Vol. 10, pp. 423 – 453.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF A FLOW THROUGH A DENSE CANOPY MODEL

Luciano Gonçalves Noleto

lucianonoleto@unb.br

Casimiro Cala

Aldo João de Sousa

aldo@unb.br

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, CEP 70910-900, Brasília-DF

brasiljr@unb.br

Abstract: *The aim of this work is to present both numerical and experimental results of the turbulent flow over a cylinder matrix. The objective is to reproduce a basic forest canopy flow. The results of this flow can allow the understanding of real canopies. The experimentation was performed in a wind tunnel, where a cylinder matrix is mounted on a flat plate at the middle of the cross section. The measurements were made by a hot-wire anemometer. The numerical simulation was performed using a URANS approach, in order to describe the unsteady behavior of the cylinder wakes. The SST model was used along with an unstructured grid. Both numerical and experimental results show good agreement between themselves. The results had showed the typical boundary layer pattern, as the presence of vortex shedding at the upstream rows of the matrix.*

Keywords: *Canopy Flow, Wind Tunnel experiments, Turbulence Modeling.*