



ESCOAMENTO TURBULENTO EM FLORESTAS: UM MODELO DE DUAS EQUAÇÕES E EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO CPB0419

Marcelo Dias de Moura

Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Mecânica - Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília - DF, CEP 70910-900, mdmoura@unb.br

Antônio C. P. Brasil Júnior

Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Mecânica - Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília - DF, CEP 70910-900, brasil@enm.unb.br

Casimiro Cala

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF, CEP 70910-900.

Resumo. *O estudo de escoamento no interior de florestas é extremamente relevante para se obter informações sobre a dinâmica de transporte de momentum, transferência de calor e massa entre os elementos de vegetação e a atmosfera. A compreensão do escoamento é o primeiro passo para a correta metodologia do modelamento da turbulência. Neste artigo um modelo k - ϵ de turbulência é proposto para descrever a velocidade média e o campo de turbulência dentro e sobre as camadas da vegetação. Experimentos em túnel de vento e dados obtidos em literaturas publicadas, também foram utilizados para validar as considerações teóricas do modelo turbulento.*

Palavras-chave: *Turbulência, Escoamento Multifásico e em Meios Porosos, Transferência de Calor e Massa, Escoamentos de Meio Ambiente.*

1. INTRODUÇÃO

A hidrodinâmica do escoamento turbulento dentro de florestas é um importante problema de mecânica dos fluidos relacionado a aspectos ecológicos da vida na floresta. A interação entre a cobertura da floresta e a atmosfera influencia o clima de uma região específica e seu ecossistema. O entendimento de transferência de calor, massa e transporte de momentum em florestas, disponibiliza aos ecologistas informações que podem ser usadas para determinar importantes características de atividades biológicas na vida da floresta. A maioria dos processos químicos e físicos da vegetação como transpiração, fotossíntese, etc. são fortemente influenciados pelos fluxos turbulentos entre floresta e atmosfera.

A descrição do escoamento do ar dentro da cobertura da floresta requer uma aproximação estatística, que considera a distribuição espacial randômica dos elementos de vegetação e as escalas espaço e tempo do escoamento turbulento. Em geral, a aproximação usada para descrever o escoamento de cobertura foi o proposto por Raupach & Thom (1981a) e Wilson & Shaw (1977). Esta metodologia considera valores médios das variáveis do escoamento usando um processo de média horizontalizada, aplicada nas equações de conservação (Raupach & Thom (1981b)). Esta metodologia tem sido usada com êxito para a modelagem de camada limite atmosférica sobre e dentro de coberturas homogêneas horizontalmente com condições de escoamento estacionário. Pode

ser interpretado também como uma aplicação particular da teoria de mistura para escoamento bi-fásico (Drew (1983)), onde é feita uma consideração específica para a homogeneidade da camada da vegetação e as características turbulentas do escoamento.

Muitos modelos diferentes de turbulência são encontrados na literatura, com relação a escoamento de cobertura de florestas. Li *et al.* (1984) propuseram um modelo de fechamento de turbulência de primeira ordem que descreve os efeitos de transporte de momentum de gradiente adverso em coberturas de florestas. O trabalho de Wilson (1988) propôs um fechamento de segunda ordem para as tensões de turbulência. Svensson & Haggkvist (1990) descrevem um modelo de duas equações, testando-o para diferentes situações relacionadas a atmosfera e medições em túnel de vento. Neste modelo algumas considerações da literatura são propostas, e substancialmente discussões físicas dos termos adicionais usados nas equações de transporte são apresentados. Wilson *et al.* (1994) usou um fechamento de primeira ordem com um modelo de uma equação, que reproduz bem o escoamento médio sobre florestas fechadas. Recentemente muitos esforços têm sido realizados para usar uma aproximação equivalente de modelagem de turbulência para os modelos de Large Eddy Simulation (Shaw & Shumman (1993), Kanda & Hino (1994)). Estas metodologias providenciam algumas informações importantes para o fechamento de turbulência para os modelos de turbulência convencionais.

O uso de um modelo de turbulência que consiga boas estimativas para as tensões de turbulência é necessário. Uma boa descrição dos fluxos de turbulência para massa e calor da cobertura da floresta para o escoamento do ar, está relacionado a estimativas realísticas das tensões de turbulência. O desenvolvimento de um modelo de duas equações é uma alternativa para descrição da turbulência dentro da cobertura da floresta, como o mesmo meio do desenvolvimento do escoamento de ar turbulento convencional sem os elementos sólidos da cobertura da floresta.

Neste trabalho uma modelagem aproximada baseada no tratamento de escoamento bi-fásico é desenvolvido. Isto é uma metodologia mais geral que pode ser extrapolada para situações complexas. Problemas com uma distribuição espacial não homogênea de vegetação como florestas fechadas, ou para os casos com muita flexibilidade da cobertura (como plantações de milho), pode ser melhor analisado por esta aproximação.

Experimentos em túnel de vento e dados obtidos em literaturas publicadas, também foram utilizados para validar as considerações teóricas do modelo turbulento. Um modelo de floresta foi construído, usando uma matriz de cilindros pêndulos. Trocando o peso do cilindro e a velocidade livre do escoamento, poderia reproduzir a flexibilidade dos elementos da vegetação. Campos de flutuações de velocidade e velocidade média foram obtidos usando anemometria de fio-quente. Resultados experimentais e numéricos foram comparados e discussões da qualidade do modelo para reproduzir o escoamento turbulento dentro e sobre a camada dos elementos flexíveis que simulam a vegetação foram desenvolvidos. Finalmente o modelo foi testado comparando com os dados de floresta tropical.

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1 Modelagem de Escoamento Bi-Fásico

A teoria de misturas de contínuos é usada para descrever o escoamento do ar dentro da cobertura da floresta. Deste ponto de vista, o escoamento é descrito pela superposição de dois contínuos médios: O escoamento do ar e os elementos sólidos da cobertura da floresta, indicado aqui pelo índice f e s , respectivamente. Neste primeiro passo o comportamento da mistura ar-vegetação pode ser modelado pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial(g_f u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\mathbf{g}_f \partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\mathbf{g}_f u_i)}{\partial x_j} = -\mathbf{j} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mathbf{j} \mathbf{m} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \mathbf{a} (u_i - v_i) \quad (2)$$

$$\frac{\mathbf{g}_s \partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial(\mathbf{g}_s v_i)}{\partial x_j} = -(1-\mathbf{j}) \frac{\partial p}{\partial x_i} + (1-\mathbf{j}) \Gamma_{sij} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \mathbf{a} (u_i - v_i) \quad (3)$$

A Equação (1) representa o balanço de massa do escoamento do ar. As equações (2) e (3) estabelecem a conservação de momento linear para o ar e os elementos sólidos da cobertura da floresta. Nestas equações u_i e v_i são as velocidades locais para as duas fases, onde i e j são índices que variam de 1 a 3, correspondendo às direções x , y e z ; \mathbf{j} é a porosidade da estrutura da vegetação e \mathbf{g}_f e \mathbf{g}_s são as densidades parciais definidas como:

$$\mathbf{g}_f = \mathbf{j} \mathbf{r}_f \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_s = (1-\mathbf{j}) \mathbf{r}_s \quad (5)$$

onde \mathbf{r}_s e \mathbf{r}_f são as densidades das componentes da mistura. \mathbf{G} é um tensor constitutivo que descreve o comportamento anisotrópico da tensão nos elementos de cobertura da floresta. \mathbf{a} é utilizado como um parâmetro para a modelagem da interação mecânica do ar e os elementos sólidos da cobertura de florestas. Podemos propor:

$$\mathbf{a} = C_D |U| \quad (6)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto hidrodinâmico do escoamento de ar sobre a vegetação, devido à força do fluido sobre os elementos da vegetação, e U é a velocidade média.

Observações:

- A velocidade média dos elementos vegetativos é zero, mas os valores instantâneos não são. Os elementos de vegetação são deformados pela força de arrasto, descrevendo um movimento de oscilação pela ação do vento.
- A deformação dos componentes de vegetação tem um comportamento anisotrópico (modelado pelo parâmetro tensorial \mathbf{G}_s). Somente os efeitos cisalhantes podem ser considerados para o presente problema.
- A porosidade é definida como uma relação entre o volume do ar no volume vazio da camada de vegetação dividido pelo volume total da camada. Para florestas homogêneas a porosidade pode ser considerada constante. Para um caso geral a porosidade tem uma variação pela sua posição, $\mathbf{j} = \mathbf{j}(\mathbf{x})$.

3.2 Modelagem da Turbulência

Ao considerarmos a turbulência, uma aproximação estatística para as Eq. (1)-(3) tem que ser usada. A decomposição clássica de Reynolds para termos médio e flutuações é usado para pressão e velocidades. Pode-se escrever como:

$$p = \bar{p} + p' \quad (7)$$

$$u_i = U_i + u'_i \quad (8)$$

$$v_i = v'_i \quad (9)$$

onde $(\bar{\quad})$, (\prime) e U_i representam, respectivamente, o operador média, as flutuações e especificamente a velocidade média do escoamento do ar.

Utilizando as Eq. (7)-(8), encontramos as versões médias para as equações governantes (1)-(3), que podem ser escritas como:

$$\frac{\partial(\mathbf{g}_f U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{g}_f \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial(\mathbf{g}_f U_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\mathbf{g}_f \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} = -\mathbf{j} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mathbf{j} \mathbf{m} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \mathbf{a} U_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\mathbf{g}_s \overline{v'_i v'_j})}{\partial x_j} = -(1-\mathbf{j}) \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mathbf{a} U_i \quad (12)$$

A equação de energia cinética de turbulência ($k_f \equiv \overline{u'_i u'_i}/2$) para o escoamento do ar é obtida pela mesma maneira da modelagem do escoamento de fase simples. Num primeiro passo uma equação para u'_i é obtida subtraindo a Eq. (11) da Eq. (2). A equação de k_f é produzida pela multiplicação do escalar da equação de u'_i pela equação de u'_i e então tirando-se a média. O resultado pode ser escrito como:

$$\mathbf{g}_f \frac{Dk_f}{Dt} = \wp_k + \frac{\mathbf{j} \mathbf{m}}{2} \mathbf{e}_f + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mathbf{m} \frac{\partial k_f}{\partial x_j} - \frac{1}{2} (\mathbf{g}_f \overline{u'_i u'_i u'_j} + \overline{p' u'_j d_{ij}}) \right] - \mathbf{a} \left(k_f - \frac{\overline{u'_i v'_i}}{2} \right), \quad (13)$$

Temos então a equação para o transporte da energia cinética de turbulência. Os vários termos que aparecem nesta equação representam o processo físico que ocorre com o movimento da turbulência sobre o escoamento. No termo do lado esquerdo da equação temos a derivada Euleriana de k que nos fornece a taxa de troca de k seguindo a partícula do fluido. Este termo é na verdade composto por dois outros termos: termo *Oscilante*, $\mathbf{g}_f (\partial k / \partial t)$, e um termo de *Convecção*, $\mathbf{g}_f U_j (\partial k / \partial x_j)$. O primeiro termo do lado direito da Eq. (13), chamado de termo de *Produção*, representa a taxa com que a energia cinética é transferida do escoamento médio para a turbulência. O segundo é o termo de *Dissipação*, nos fornece a taxa com que a energia cinética de turbulência é convertida em energia interna térmica. O termo envolvendo $\mathbf{m} \partial k_f / \partial x_j$ é conhecido como termo de *Difusão Molecular*, que representa a difusão da energia de turbulência causada pelo processo de transporte molecular natural do fluido. Temos, também, o termo de correlação tripla de velocidade, chamado de *Transporte Turbulento* e o considerando como a taxa pela qual a energia de turbulência é transportada sobre o fluido pelas flutuações de turbulência. Ainda dentro dos colchetes temos o termo de *Difusão de Pressão*, outra forma do transporte turbulento resultante da correlação de pressão e flutuação de velocidade. Os dois último termos são a *Dissipação de Arrasto*, representam uma dissipação adicional devido às forças de arrasto sobre os elementos de vegetação.

Utilizando um modelo tipo Boussinesq de viscosidade turbulenta para o tensor de tensões turbulentas, pode-se propor:

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} k_f \mathbf{d}_{ij} - \mathbf{n}_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

Neste trabalho a viscosidade turbulenta será descrita pela relação de Prandtl-Kolmogorov sendo proposta no campo do modelo de duas equações de turbulência como segue:

$$\mathbf{n}_T = C_m \frac{k_f^2}{\mathbf{e}} \quad (15)$$

O termo de difusão de pressão tem sido geralmente agrupado com o termo de transporte turbulento da Eq. (13) e a soma tem comportamento como um processo do gradiente de transporte. Resultados de DNS (e. g. Mansour, Kim e Moin (1988)) indicam que o termo é muito pequeno para escoamentos simples. Deste modo assumimos que:

$$\frac{1}{2} (\mathbf{g}_f \overline{u'_i u'_i u'_j} + \overline{p' u'_j \mathbf{d}_{ij}}) = - \frac{\mathbf{m}_T}{\mathbf{s}_{kf}} \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \quad (16)$$

Utilizando as descrições das Eq. (14)-(16), a Eq. (13) pode ser fechada usando as considerações padrões para o modelo $k - \mathbf{e}$ de turbulência, então esta equação pode ser escrita como:

$$\mathbf{g}_f \frac{Dk_f}{Dt} = \wp_k + \frac{\mathbf{j} \mathbf{m}}{2} \mathbf{e}_f + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mathbf{m} + \frac{\mathbf{m}_T}{\mathbf{s}_{kf}} \right) \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \right] - \mathbf{a} \left(k_f - \frac{\overline{u'_i v'_i}}{2} \right), \quad (17)$$

onde $\wp_k = (-\overline{u'_i u'_j} / 2) (\partial(\mathbf{g}_f U_i) / \partial x_j)$, é o termo de produção da energia cinética de turbulência.

O termo em que aparece a correlação dupla de velocidade do escoamento do ar e velocidade dos elementos sólidos de vegetação podem ser escritos da seguinte forma:

$$\frac{\overline{u'_i v'_i}}{2} = - \frac{(1-j)}{2} \Gamma_{sij} \mathbf{e}_s - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[(1-j) \Gamma_{sij} + \frac{\mathbf{m}_T}{\mathbf{s}_{ks}} \right] \frac{\partial k_s}{\partial x_j} \right\} + \mathbf{a} k_s, \quad (18)$$

onde $k_s \equiv \overline{v'_i v'_i} / 2$ e $\mathbf{e}_s = \overline{(\partial v'_i / \partial x_j) (\partial v'_i / \partial x_j)}$ são, respectivamente, a energia cinética de turbulência e a taxa de dissipação de energia cinética de turbulência dos elementos sólidos de vegetação.

A equação para transporte de \mathbf{e} pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\mathbf{g}_f \frac{D\mathbf{e}_f}{Dt} = \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mathbf{m} + \frac{\mathbf{m}_T}{\mathbf{s}_{ef}} \right) \frac{\partial \mathbf{e}_f}{\partial x_j} \right] + C_{ef1} \frac{\mathbf{e}_f}{k_f} \wp_k + C_{ef2} \frac{\mathbf{j} \mathbf{m}}{2} \frac{\mathbf{e}_f^2}{k_f} - \mathbf{a} \left(\mathbf{e}_f - \frac{\mathbf{e}_f \overline{u'_i v'_i}}{k_f} \right) \quad (19)$$

4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O escoamento turbulento em torno de estruturas flexíveis, ou mesmo sobre elementos sólidos sujeitos à vibrações livres é extremamente complexo devido à interação fluido-estrutura. Assim a opção do trabalho foi adotar uma matriz de cilindros pendulares de diâmetro D e comprimento H , posicionados em uma camada limite turbulenta. A massa do cilindro é designada por m , e a velocidade externa da camada limite por U_o , como podemos ver na Fig. (1).

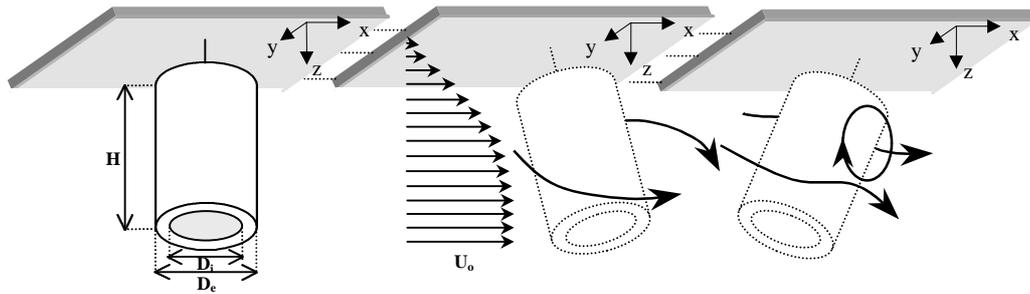


Figura 1. Movimento Pendular do Cilindro

Para um elemento prismático pendular (no caso específico uma matriz de cilindros, tal como mostrado na Fig. (1)) o escoamento é resultado da dinâmica deste corpo rígido. As escalas características de tempo e comprimento na esteira serão influenciadas pela amplitude do movimento pendular do cilindro, sendo que o mesmo atuará como um filtro sobre determinadas escalas, ampliando-as ou atenuando-as. De forma a parametrizar o efeito do movimento pendular do cilindro no escoamento, propõe-se um número adimensional (massa equivalente, λ) que relacione a massa do cilindro, a velocidade do escoamento e as dimensões do pêndulo, na forma:

$$I = \frac{mg}{rU_o^2DH} \quad (20)$$

Os experimentos do presente trabalho foram desenvolvidos em um túnel de vento aerodinâmico de seção de trabalho de 650 X 650 mm por 3600 mm de comprimento. Este túnel de vento permite o ensaio de modelos com velocidades de trabalho de até 25 m/s. Este escoamento é provido por um ventilador axial de 40 CV instalado em uma caixa de 4 m³, succionando o ar através da seção de ensaio. O controlador de velocidade eletrônico do motor do ventilador permite o desenvolvimento de ensaios em uma grande faixa de velocidades.

Na entrada do túnel um bocal convergente, associado a um conjunto de telas, permite a obtenção de um escoamento com intensidade de turbulência de 0,5 %. A 100 mm da parede superior da seção de ensaios, uma placa plana foi posicionada, servindo como base para o escoamento em camada limite. Esta placa é chanfrada a 45° na extremidade de entrada afim de tornar mais suave a entrada do escoamento.

Uma matriz de 88 cilindros de 75 mm de comprimento por 19 mm de diâmetro externo e 15 mm de diâmetro interno, confeccionados em alumínio, foram posicionados na placa plana de maneira pendular, em arranjo defasado, sendo o espaçamento igual a 75 mm, como forma de simular a camada vegetal, como mostrado na Fig. (2).

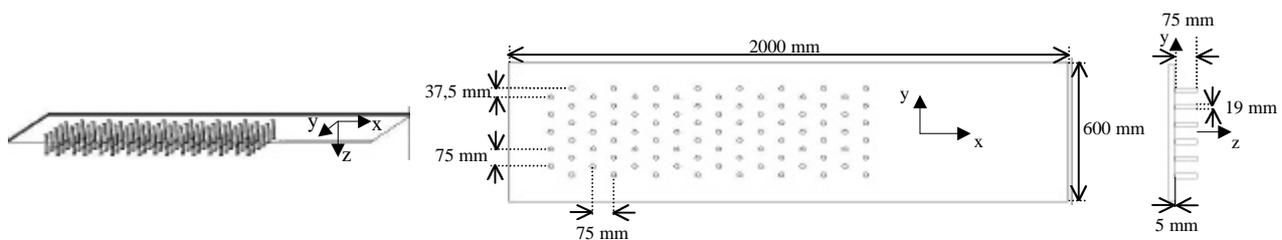


Figura 2. Representação da Matriz de Cilindros-Pêndulos.

Para medição de velocidade um sistema de anemometria de fio quente unidimensional, marca DISA foi utilizado. Este sistema é composto por um módulo básico a temperatura constante modelo 55D01, combinado com um voltímetro digital e uma unidade para medição do valor RMS, modelos

55D31 e 55D35, respectivamente. Os sinais de saída também foram captados em um osciloscópio digital marca Hewlett-Packard modelo 54600A. Os dados então digitalizados na memória do osciloscópio são transferidos para um computador tipo PC 486, via interface digital HP-IB.

Para análise em frequência do sinal de velocidade na esteira do cilindro, um analisador de sinais marca Hewlett-Packard modelo 35665A, foi instalado. Este sistema permitiu a obtenção de espectros da flutuação de velocidade na esteira do escoamento.

As medições foram realizadas com sondas unidirecionais DISA, de tungstênio, de 5 μm de diâmetro. Esta sonda foi posicionada em um deslocador vertical, permitindo posicionamentos em décimos de milímetro. Para a medição de perfis horizontais, este deslocador foi posicionado na parede lateral do túnel. O dispositivo porta-sonda é confeccionado de maneira tal que um tubo de pitot é posicionado lateralmente à sonda de fio quente. Desta maneira, uma vez a cada dia de testes, a calibração da sonda é feita no próprio túnel em uma posição central da seção, variando sua velocidade em toda a gama de teste. O tubo de pitot é conectado a um micro-manômetro que permite a medição de pressões diferenciais com resoluções de décimos de milímetro de coluna de água.

O escoamento foi analisado com duas massas diferentes para os cilindros (30 gramas e 50 gramas). Foram levantados os perfis de velocidade e intensidade de turbulência verticais nas posições $x/D = 4$, $x/D = 6$ e $x/D = 8$, (x é a coordenada longitudinal, indicando o sentido do escoamento e D o diâmetro do cilindro) à jusante do cilindro base, para três diferentes números de Reynolds ($Re = 10 \times 10^3$, $Re = 21 \times 10^3$ e $Re = 32 \times 10^3$). Para tal o deslocador do suporte do sensor, colocado na parte inferior do túnel, deslocava-se verticalmente com um passo de 2 mm, desde 5 mm da placa, na qual se encontravam montados os cilindros, até 60 mm fora da matriz.

Foi levantada também a variação vertical dos espectros de energia das flutuações de velocidade, com a mesma montagem, em $x/D = 6$.

6. RESULTADOS

Para a comparação numérica da resolução do problema de camada limite sobre e dentro da matriz de cilindros pendulares foi elaborado um programa baseado no Método de Elementos Finitos, que gerou uma malha de cálculo onde lhe foi atribuída os parâmetros físicos e as constantes do problema.

A malha gerada abrange volumes de controle dentro da matriz de cilindros pendulares e a uma distância de $2H$ da altura do cilindro. Sendo mais refinada dentro da camada de cilindros da matriz e mais distanciada fora do cilindro.

Para o caso dos cilindros pendulares consideramos a densidade de área a , um valor constante que representa a distribuição da área ocupada pelos cilindros em relação ao volume total da matriz onde se encontram. Já se estivéssemos trabalhando com um caso real como uma floresta ou plantações, representado na Fig. (4), o valor de a mudaria de acordo com a altura da vegetação.

A comparação dos resultados numéricos foram feitas utilizando dos mesmos parâmetros nos experimentos em túnel de vento e plotados os gráficos juntamente com os dados reais de floresta do trabalho de Raupach & Thom (1981) e simulação da plantação de Milho de Li *et al.* (1985).

Nos experimentos em túnel de vento utilizou-se uma variação da massa equivalente, λ , na faixa de 0,46 a 4,46. Isto devido às massas distintas utilizadas nos cilindros e às velocidades externas diferentes de camada limite.

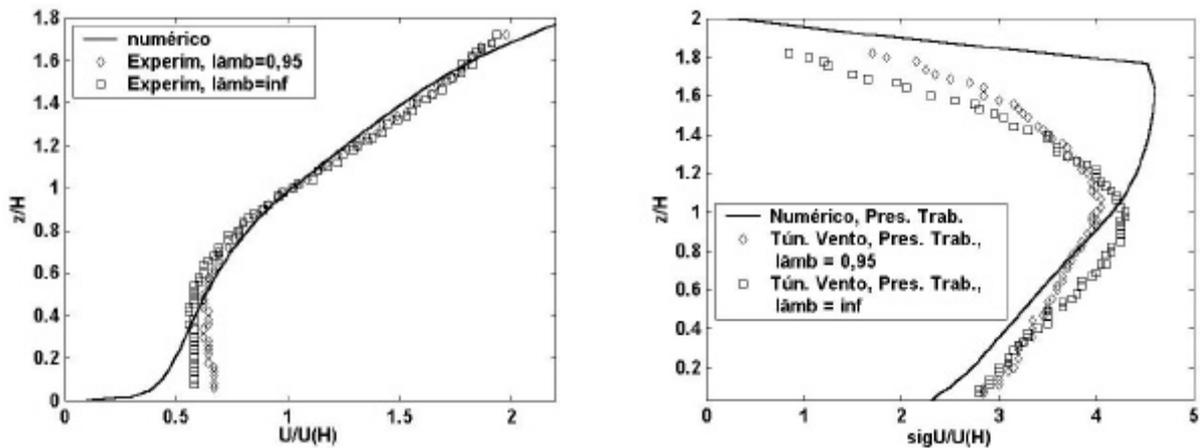


Figura 3. Perfis Verticais ($\lambda = 0,95$ e $\lambda = \infty$, em $x/D = 6$).

(a) variação da velocidade, $U/U(H)$, em relação a altura do cilindro, z/H . (b) variação da intensidade de turbulência, $u'/U(H) \times 10^2$, em relação a altura do cilindro, z/H .

Na Fig. (3), para uma mesma velocidade externa à camada limite (equivalente a $Re = 21 \times 10^3$), são apresentados perfis de velocidade média, Fig. (3a), e variação da intensidade de turbulência, Fig. (3b), na posição $x/D = 6$, dados estes dos experimentos em túnel de vento. Observa-se que o efeito da flexibilidade, embora pequeno, tem alguma influência na desaceleração do escoamento dentro da matriz. Este fenômeno é observado também nos resultados obtidos por Raupach & Thom (1981), Fig. (4), no estudo do escoamento em florestas e plantações de milho, onde também comparamos com a simulação numérica feita por Li *et al.* (1985) apresentada no mesmo gráfico.

No topo da matriz, o cilindro mais rígido ($\lambda = \infty$) têm a tendência de apresentar maior intensidade de turbulência, Fig (3b), o que pode significar um menor amortecimento dos efeitos de ponta em comparação com os cilindros mais flexíveis ($\lambda = 0,95$ e $\lambda = 1,58$).

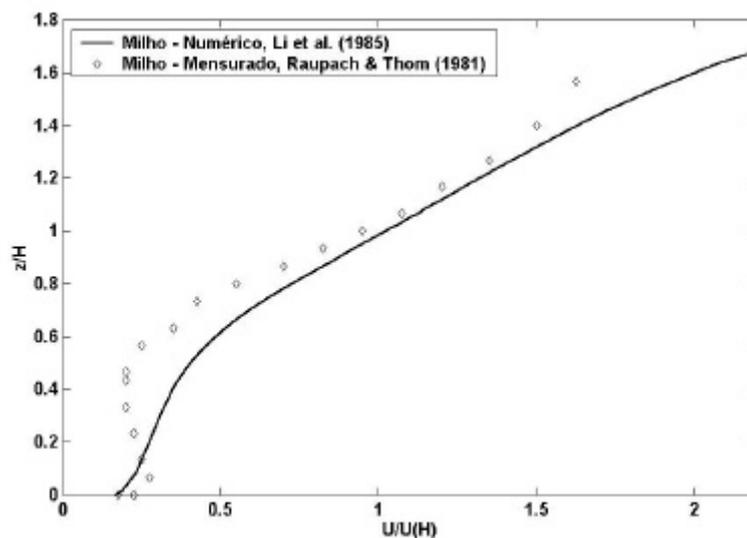


Figura 4. Comparação dos Experimentos em Túnel de Vento e a Simulação Numérica com os resultados de Raupach & Thom (1981).

Outro fenômeno que ocorre é que para um número de Reynolds elevado observa-se uma menor desaceleração do escoamento. Duas razões podem ser adiantadas para o fato, primeiro tem-se com uma elevada velocidade, uma maior energia cinética média disponível para vencer o arrasto, por outro lado uma elevada velocidade inibe a possibilidade de ocorrência de escoamento ascendente. Esta argumentação no entanto não é completamente sustentável com o presente trabalho, pois o escoamento ascendente deve-se principalmente à convecção livre associada aos efeitos térmicos, conforme se pode encontrar no trabalho de Raupach & Thom (1981).

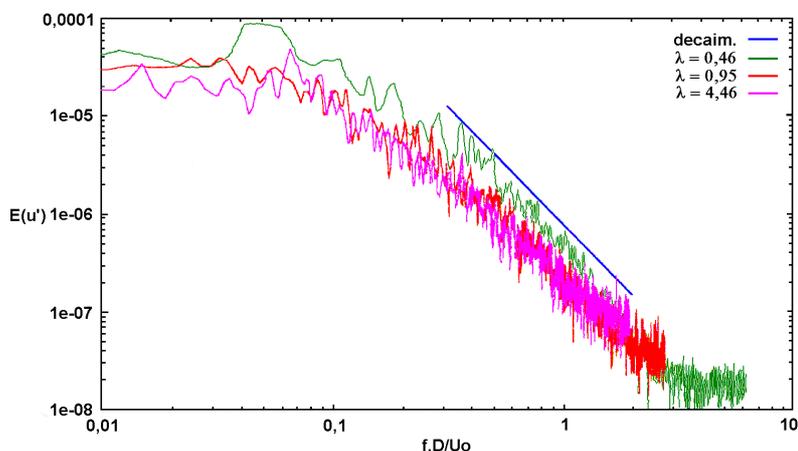


Figura 5. Variação de energia espectral com λ , por variação do número de Reynolds.

Outra forma de justificar a menor desaceleração, para grandes números de Reynolds é recorrer à massa equivalente (λ) do cilindro. Quanto maior λ , maior será a rigidez do cilindro, logo menor a energia de oscilações susceptíveis de devolução ao escoamento e, portanto, maior será a desaceleração, como se observa na Fig. (3a).

Estes resultados concordam também com os apresentados por Ruck & Adams (1991), para uma simulação em túnel de vento com elementos vegetativos. No trabalho de Ruck & Adams (1991) são ainda apresentadas as linhas de corrente do escoamento, o que torna evidente a presença da bolha de recirculação, imediatamente à jusante do elemento, que pode também ser responsável pelos baixos valores de velocidade na imediata vizinhança do obstáculo.

Na Fig. (5) é apresentado as energias espectrais das flutuações de velocidade. Observa-se uma amplificação abaixo da frequência natural do cilindro. Ainda que não muito nítido observa-se a tendência de a matriz com cilindros mais leves apresentar maior amplificação, o que é natural pois a sua oscilação é mais intensa. Pode-se verificar que o decaimento da energia espectral é de cerca de $-5/3$, o que está de acordo com os resultados de várias medições *in situ* apresentadas por Seginer *et al.* (1976).

7. REFERÊNCIAS

- Drew, D., 1983, "Mathematical Modeling of Two-Phase Flow", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, pp. 261-291.
- Kanda, M. & Hino, M., 1994, "Organized Structures in Developing Turbulent Flow within and above a Plant Canopy, Using a Large Eddy Simulation, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 68, pp. 237-257.
- Li, Z. J., Miller, D. R. & Lin, J. D., 1984, "A First-Order Closure Scheme to Describe Counter-Gradient Momentum Transport in Plant Canopies", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 33, pp. 77-83.

- Raupach, M. R. & Thom, A. S., 1981, "Turbulence in and Above Plant Canopies", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 13 , pp. 97-129.
- Raupach, M. R. & Shaw, R. H., 1976, "Averaging Procedures for Flow within Vegetation Canopies", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 19, pp. 79-90.
- Ruck B. & Adams E., 1991, "Fluid Mechanical Aspects of the Pollutant Transport to Coniferous Tress", Boundary Layer Meteorology, Vol. 56, pp. 163-195.
- Shaw, R. H. & Shumann, U., 1992, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Above within a Forest", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 61, pp. 47-64.
- Seginer, J., Mulhearn, P. J., Brandley, E. R. & Finnigan, J. J., 1976, "Turbulent Flow in a Model Plant Canopy", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 10, pp. 423-453.
- Svensson, U. & Häggkvist, K., 1990, "A Two Equation Turbulence Model for Canopies Flows", Journal of Wind Engineering and Industry Aerodynamics, Vol. 35, pp. 201-211.
- Wilson, N. R. & Shaw, R. H., 1977, "A High Order Closure Model for Canopy Flow", J. Appl. Meteorology, Vol. 16, pp. 1197-1205.
- Wilson, J. D., 1988, "A Second-Order Closure Model for Flow Through Vegetation", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 42, pp. 371-392.

CANOPY TURBULENT FLOW: TWO EQUATIONS MODEL AND WIN TUNNEL EXPERIMENTS

Marcelo Dias de Moura

University of Brasília - Department of Mechanical Engineering, 70910-900 Brasília, DF, Brasil
e-mail: mdmoura@unb.br

Antônio C. P. Brasil Júnior

University of Brasília - Department of Mechanical Engineering, 70910-900 Brasília, DF, Brasil
e-mail: brasil@enm.unb.br

Casimiro Cala

University of Brasília - Department of Mechanical Engineering, 70910-900 Brasília, DF, Brasil.

***Abstract.** The study of flow inside forest is strongly relevant in order to provide information about the momentum, heat and mass transfer between the vegetation elements and the atmosphere. The comprehension of the dynamics of the flow is the first step. In this paper a $k-\epsilon$ model of turbulence is proposed to describe the mean velocity and turbulent field inside and over the vegetation layer. Wind tunnel experiments were also performed in order to check the theoretical considerations of the turbulent model.*

***Keywords:** Turbulence, Multiphase Flow and porous mean, Hot and Mass Transfer, Environmental Flows.*