

### 3

## Modelagem da Turbulência sobre Florestas

O conhecimento da estrutura do escoamento do ar sobre florestas é necessário para um melhor entendimento do impacto que os elementos da vegetação causam no campo de vento, na deposição de nutrientes e poluentes, no transporte de energia e matéria. Neste capítulo estuda-se as características dos campos médio e turbulento em superfícies vegetadas. Maiores detalhes da sub-camada rugosa ocupada por florestas são encontrados em Raupach et al. (1996) e mais recentemente em Finnigan (2000).

Neste trabalho foi utilizado um modelo matemático para descrever em escala reduzida, o escoamento turbulento dentro e acima de superfícies vegetadas, em condições de estabilidade neutra.

Para avaliar o comportamento do escoamento nestas condições, os resultados numéricos foram comparados com resultados de experimentos de túnel de vento realizados por Novak et al. (2000) e Novak et al. (2001). Neste caso foram usadas três metodologias, empregando-se o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  padrão.

Na primeira e segunda metodologia, denominadas respectivamente, modelagem por termos fontes e modelagem por meio poroso, considerou-se que  $L_f \gg h_f$ , onde  $L_f$  e  $h_f$ , são o comprimento e a altura da floresta, respectivamente. Assim, realizou-se simulações bi-dimensionais (2-D). Na terceira metodologia, denominada de modelagem por elementos rugosos, foram construídos modelos de árvores tri-dimensionais (3-D) com dimensões próximas aos modelos experimentais. Neste caso, considerou-se a existência de um plano de simetria do túnel de vento. Estas três metodologias podem ser resumidas nas seguintes formas:

- (I) Modelagem por termos fontes: A influência das forças de arrasto aerodinâmico dos elementos da vegetação no escoamento atmosférico foi modelada através da introdução de um termo de sumidouro na equação de quantidade de movimento e termos fontes nas equações da energia cinética turbulenta e taxa de dissipação de energia do modelo  $k - \varepsilon$  padrão.

- (II) Modelagem por meio poroso: A região de floresta foi tratada como um meio poroso homogêneo. Neste caso, um termo de sumidouro devido o escoamento em meios porosos, o termo de Darcy-Forchheimer, foi adicionado à equação de quantidade de movimento.
- (III) Modelagem por elementos rugosos: escoamento sobre um modelo de floresta 3-D, na qual as árvores foram tratadas como obstáculos individuais.

Neste trabalho foram resolvidas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Este tipo de abordagem permitiu investigar a influência da vegetação sobre o escoamento atmosférico sem os elevados custos dos experimentos de campo.

### 3.1

#### Perfil do Vento e Turbulência

Segundo Raupach et al. (1996) e Finnigan (2000) os padrões dos campos de vento e das grandezas turbulentas do escoamento dentro e acima de diferentes tipos de vegetação apresentam características comuns, que incluem:

- (I) Um perfil logarítmico padrão da velocidade do vento, acima do dossel, característico da sub-camada inercial;
- (II) Na interface floresta-atmosfera existe um grande cisalhamento ( $du/dz$ ) que induz um ponto de inflexão no perfil de velocidade do vento. Este ponto de inflexão corresponde a uma instabilidade hidrodinâmica, a qual gera as estruturas coerentes;
- (III) Vórtices coerentes com escalas de comprimento da ordem da altura do dossel. Estes são os principais responsáveis pelas trocas turbulentas entre o interior do dossel ( $z < h_f$ ) e a superfície acima ( $z > h_f$ );
- (IV) Entre a base e o topo da copa ocorre um decréscimo exponencial da velocidade do vento, conduzindo a baixas velocidades no interior do dossel;
- (V) Entre o solo e a base da copa das árvores existe um outro perfil logarítmico da velocidade do vento;
- (VI) O arrasto aerodinâmico das plantas causa o ponto de inflexão no perfil da velocidade do vento e um mecanismo denominado de curto-circuito espectral;

- (VII) O dossel é um sumidouro de quantidade de movimento que é absorvido pelas forças de arrasto de pressão e viscoso, induzidas pelos elementos das plantas (folhas, galhos e tronco);
- (VIII) As flutuações turbulentas decaem dentro do dossel. Por exemplo, a partir do balanço da energia cinética turbulenta, Dwyer et al. (1997) mostraram que a turbulência foi amortecida em todo o dossel e um transporte líquido ocorreu das altas para baixas regiões.

É importante destacar que a existência do ponto de inflexão no perfil vertical da velocidade do vento, que gera instabilidades hidrodinâmicas no escoamento turbulento, dificulta uma caracterização do escoamento sobre florestas em termos da Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (Brunet & Irvine, 2000). Portanto, inexistente uma teoria de similaridade para descrever as características universais do campo de velocidade dentro do dossel da floresta (Brunet & Irvine, 2000).

### 3.1.1 Espectro da Energia Turbulenta

Segundo a teoria de Kolmogorov, a transferência de energia cinética turbulenta (ECT) entre o escoamento médio (com elevado número de Reynolds) e a turbulência é governada pela dinâmica dos vórtices das maiores escalas e então dissipada pelos vórtices das menores escalas, (Ayra, 1988). A energia é transferida através de um processo denominado cascata de energia que envolve todas as escalas intermediárias (Tennekes, 1974). Os maiores vórtices colapsam-se em vórtices menores sucessivamente até atingirem as menores escalas. Nos vórtices das menores escalas ocorre uma dissipação de energia, isto é, a ECT é transformada em energia interna (calor) devido aos efeitos viscosos, Figura (3.1).

No interior do dossel da vegetação este processo é modificado. Os elementos da vegetação geram esteiras turbulentas, onde ocorre a transformação da energia cinética do escoamento médio e ECT dos vórtices das maiores escalas em energia cinética da esteira. Devido à interação com a vegetação, os vórtices das maiores escalas são transformados em vórtices das menores escalas, sem envolver as escalas intermediárias, ou seja, existe uma passagem-secundária da cascata de energia acelerando a taxa de dissipação total. Este mecanismo é denominado de “curto-circuito espectral”, Figura (3.2) (Finnigan, 2000).

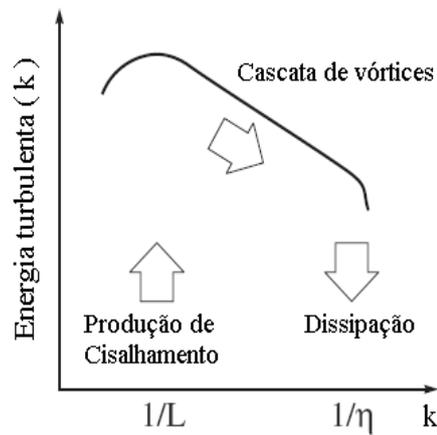


Figura 3.1: Espectro da energia turbulenta em regime de turbulência livre. Fonte: Adaptada de Finnigan (2000).

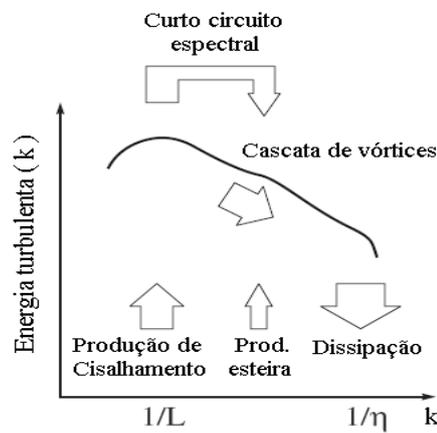


Figura 3.2: Espectro da energia turbulenta no interior do dossel da vegetação. Fonte: Adaptada de Finnigan (2000).

### 3.2 Estrutura do Escoamento Sobre Florestas

A estrutura do escoamento sobre regiões de florestas é influenciada pela dinâmica das interações planta-atmosfera que ocorrem em todas as escalas de comprimento. A velocidade do vento médio na sub-camada rugosa depende de como um vórtice turbulento originado na CLP pode penetrar no interior do dossel e como os elementos das plantas absorvem quantidade de movimento através do arrasto de pressão e viscoso. De um ponto de vista aerodinâmico, as florestas representam uma mudança na rugosidade superficial, na porosidade e na altura efetiva da superfície (deslocamento do plano zero) (Irvine et al., 1997).

### 3.2.1

#### Transição da Superfície Plana Para a Rugosa

A transição da superfície plana para a camada do dossel causa fortes perturbações no escoamento incidente que se choca contra a região frontal da floresta. Esta perturbação em conjunto com as novas condições superficiais propaga-se a jusante pelo escoamento médio (Irvine et al., 1997). Horizontalmente, três regiões distintas podem ser observadas, conforme mostra a Figura (3.3) (Stacey et al., 1994; Morse et al., 2002):

- (I) O escoamento do ar sofre uma desaceleração ao penetrar no interior do dossel devido a ação das forças de arrasto e ocorre um gradiente de pressão adverso no sentido oposto do escoamento. De  $x = 0 h_f$  a  $x = 2 h_f$ , o escoamento médio desvia-se para cima, ou seja, ocorre uma distorção ao escoamento;
- (II) Enquanto o escoamento médio ajusta-se rapidamente a essas novas condições, os parâmetros turbulentos irão se ajustar somente de  $x = 2 h_f$  a  $x = 7 h_f$ , em relação a distorção que ocorre na região I (Morse et al., 2002);
- (III) A partir de  $x = 7 h_f$  (ou  $x = 12 h_f$ ), o escoamento médio e a turbulência geralmente tendem a uma condição de equilíbrio homogêneo no interior e acima da interface vegetação-atmosfera.

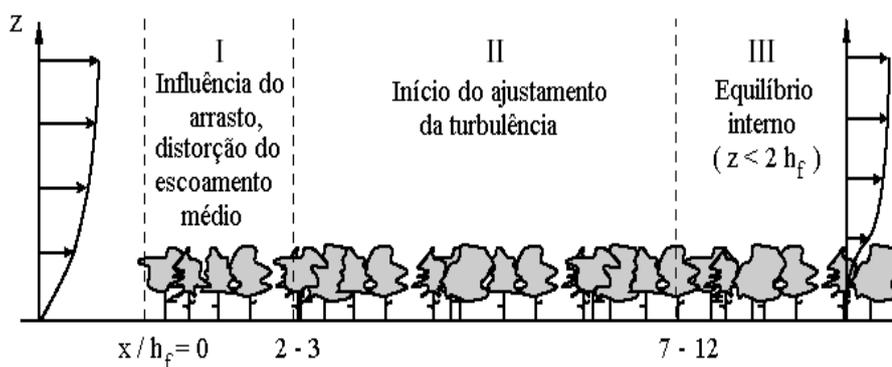


Figura 3.3: Três regiões características da transição da superfície plana para a camada do dossel. Fonte: Adaptada de Krzikalla (2005).

### 3.2.2 Transição da Superfície Rugosa Para a Plana

A Figura (3.4) mostra o comportamento do escoamento do ar na região de esteira da floresta. Na região I, geralmente ocorre uma zona de calmaria caracterizada por baixas velocidades do vento, como pode ser notado na figura (3.4). A camada de mistura que se desenvolve no topo do dossel é transportada para cima e para baixo, região II da Figura (3.4). A seguir forma-se uma zona perturbada induzida pela esteira, onde o escoamento alcança uma condição de equilíbrio, de forma a se ajustar a essa nova condição superficial, região III na Figura (3.4)(Krzikalla, 2005).

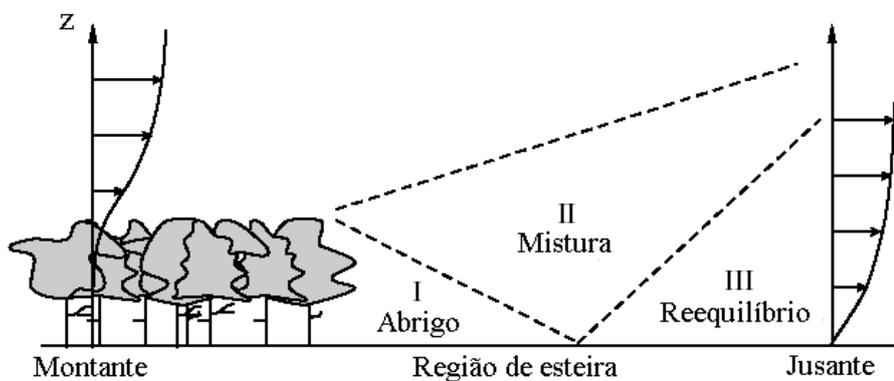


Figura 3.4: Escoamento do ar na região de esteira de uma floresta. Fonte: Adaptada de (Krzikalla, 2005).

### 3.3 Analogia com a Camada de Mistura

O desenvolvimento de uma camada de mistura é devido à existência de diferenças de velocidade no interior de um escoamento. Normalmente têm-se uma camada altamente cisalhante que separa duas camadas de escoamentos uniformes com velocidades diferentes.

Neste tipo de escoamento as instabilidades que se desenvolvem são resultantes do processo de amplificação de perturbações injetadas no seu interior por fontes externas. Neste caso uma frequência que será amplificada com taxa de amplificação máxima e que se manifestará em primeiro lugar. Posteriormente, estas instabilidades induzirão outras frequências harmônicas que por sua vez induzirão novas frequências e assim até a degeneração em turbulência.

A estrutura do campo de escoamento médio e turbulento próximo ao topo do dossel, reflete mais as características do escoamento na camada de

mistura (CM) do que na camada limite (Raupach et al., 1996; Finnigan, 2000). Neste contexto, Raupach et al. (1989) propuseram uma hipótese na qual a camada de mistura pode ser considerada um padrão para a turbulência em dosséis. No trabalho realizado por Raupach et al. (1996) foram apresentadas mais evidências que deram suporte a esta hipótese. Segundo Raupach et al. (1996) e Katul et al. (1998a) estas evidências foram testadas e confirmadas em vários experimentos de campo e de túnel de vento para diferentes tipos de vegetação, sendo estabelecido assim, alguns limites para sua aplicabilidade .

Além disso, de acordo com Raupach et al. (1996) e Katul et al. (1998a), foram considerados que a turbulência e os movimentos coerentes próximos ao topo do dossel apresentavam um padrão da CM devido às instabilidades associadas com o ponto de inflexão do perfil velocidade média. A geração de vórtices coerentes com escalas de comprimento da ordem da altura do dossel contribui intensamente para as trocas turbulentas entre as regiões acima e abaixo da interface vegetação atmosfera (Raupach & Thom, 1981).

A Figura (3.5) mostra uma analogia entre o deslocamento do perfil de velocidade na camada limite sobre uma superfície plana e a CM. Esta analogia permite explicar vários fatores particulares do escoamento, tais como as escalas de comprimento turbulentas, o papel desempenhado pelo transporte turbulento e as razões entre as grandezas estatísticas.

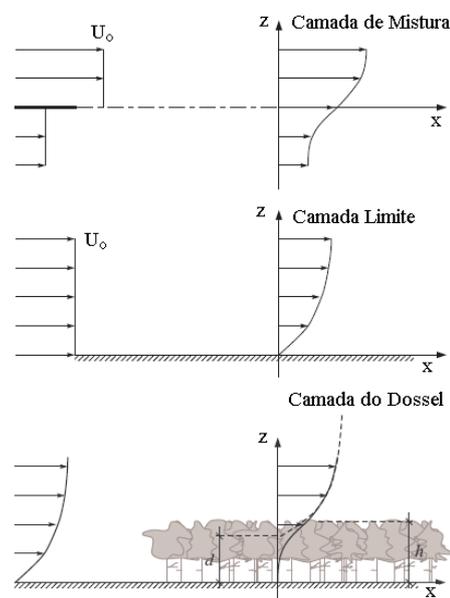


Figura 3.5: Deslocamento do perfil da camada limite e uma analogia com a camada de mistura. Fonte: Adaptada de Krzikalla (2005).

O efeito do deslocamento induzido pelo dossel é descrito com a introdução do deslocamento do plano zero, o que corresponde a altura  $d$  na

figura (3.5). Uma detalhada descrição das propriedades e do desenvolvimento da CM sobre dosséis pode ser encontrada em Raupach et al. (1996) e Finnigan (2000).

A altura da camada de mistura pode ser caracterizada pela espessura de vorticidade ( $\delta_\omega$ ), dada por (Finnigan, 2000 e Novak et al., 2000):

$$\delta_\omega = \frac{\Delta U}{(\partial \bar{u} / \partial z)_{max}} \quad (3-1)$$

onde  $\Delta U$  é a diferença de velocidade da corrente livre acima e abaixo da interface vegetação-atmosfera.

No trabalhos realizado por Raupach et al. (1986), Raupach et al. (1996) e Finnigan (2000), foi proposto que as escalas de comprimento turbulentas, associadas às transferências verticais de quantidade de movimento próximo ao topo da copa, podem ser controladas por uma escala de comprimento do cisalhamento do vento ( $L_s$ ), dada por:

$$L_s = \frac{\bar{u}_h}{(\partial \bar{u} / \partial z)_z} \cong \frac{1}{2} \delta_\omega \quad (3-2)$$

onde  $\bar{u}_h$  é a velocidade média do vento na altura  $h$  e  $(\partial \bar{u} / \partial z)_h$  representa o cisalhamento vertical da velocidade média do vento no topo da copa.

Outra escala característica da CM é o espaçamento na direção do fluxo entre as sucessivas estruturas turbulentas coerentes ou comprimento de onda,  $\Lambda_x$ , que é equivalente ao comprimento de onda inicial das instabilidades de Kelvin-Helmholtz (Finnigan, 2000):

$$\Lambda_x = mL_s \quad (3-3)$$

onde  $m$  é uma constante empírica que varia de 7 até 10 (Finnigan, 2000).

### 3.4

#### Modelagem Matemática do Escoamento sobre Florestas

Na literatura são encontrados diferentes modelos de turbulência desenvolvidos para investigar a estrutura do escoamento sobre florestas (Wilson & Shaw, 1977; Svensson & Häggkvist, 1990; Katul et al., 2004) consideraram que o estudo deste fenômeno requer uma aproximação estatística, que considera a distribuição espacial randômica dos elementos da vegetação e as escalas temporais e espaciais do escoamento turbulento.

Dentro deste contexto, Raupach & Shaw (1982) formalizaram o conceito do operador de média horizontal, aplicada às equações de conservação,

a partir do modelo proposto por Wilson & Shaw (1977). Além disso, neste trabalho foi proposto que o escoamento no interior e acima do dossel da vegetação apresenta características fortemente 3-D, devido às influências mecânicas e térmicas geradas pela complexa geometria dos elementos da vegetação. Entretanto, um dossel homogêneo é geralmente caracterizado por sua altura,  $h_f$ , e por uma grande dimensão horizontal ( $L_f$ ), sobre uma superfície plana, com  $h_f \ll L_f$ . Portanto, em pesquisas teóricas e experimentais da interação vegetação-atmosfera geralmente considera-se uma estrutura uni-dimensional (1-D) do escoamento (Raupach & Shaw, 1992; Liu et al., 1995) e em condições de estabilidade neutra.

Considerando-se o operador de média horizontal, numa estrutura 1-D, é possível descrever vários efeitos 3-D do dossel: o arrasto de pressão, o arrasto viscoso e a geração da esteira turbulenta com escalas de comprimento determinadas pelos elementos das árvores. No estudo realizado por Raupach & Shaw (1982) foi descrito este escoamento, considerando-se dois esquemas para o operador de média horizontal, denominados de esquemas I e II:

- (I) Esquema I: Uma média horizontal é aplicada sobre o campo de escoamento instantâneo, considerando-se uma superfície plana suficientemente grande, a fim de eliminar as variações causadas pela arquitetura da vegetação e as grandes escalas do escoamento turbulento;
- (II) Esquema II: Uma média temporal é aplicada no escoamento 3-D sobre o dossel e a seguir aplica-se uma média horizontal sobre um plano suficientemente grande, a fim de eliminar somente as variações causadas pela arquitetura da vegetação.

Esta superfície deve ser fina o suficiente de modo a preservar as variações características das propriedades na escala vertical. Os efeitos de ambos esquemas são considerados nas equações de conservação das grandezas médias e momentos de segunda ordem. Estes dois esquemas geram resultados idênticos (Wilson & Shaw, 1977; Raupach & Thom, 1981). Maiores detalhes das propriedades do operador de média horizontal podem ser encontrados em Raupach & Thom (1981).

### 3.5

#### **Equações Governantes do Escoamento sobre Florestas**

Nesta seção serão apresentadas as equações que governam o escoamento turbulento dentro e acima de superfícies vegetadas. Devido a sua

importância no desenvolvimento dos vários modelos encontrados na literatura, principalmente em relação a introdução dos termos fontes (Svensson & Häggkvist, 1990; Katul et al., 2004), serão apresentados aqui os esquemas I e II propostos por Wilson & Shaw (1977) e Raupach & Thom (1981).

Na camada do dossel imersa na camada limite superficial, na ausência da força de Coriolis e de efeitos de empuxo térmico, a equação que governa o escoamento dentro e acima da interface vegetação-atmosfera, na forma de Navier-Stokes pode ser dada por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (3-4)$$

No esquema I, são inseridos os operadores de média,  $u_i = \langle u_i \rangle + u_i''$  e  $p = \langle p \rangle + p''$  na equação (3-4) e a seguir aplica-se uma média espacial. Neste caso a equação (3-4) pode ser escrita na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle u_i'' u_j'' \rangle &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial p''}{\partial x_i} \right\rangle \\ &+ \nu \nabla^2 \langle u_i \rangle + \nu \langle \nabla^2 u_i'' \rangle \end{aligned} \quad (3-5)$$

O segundo e o quarto termos do lado direito da equação (3-5) representam, respectivamente, as influências do arrasto de pressão e viscoso gerados pelos elementos da vegetação sobre o escoamento Wilson & Shaw (1977). Assumindo a hipótese de escoamento permanente e desprezando-se o gradiente de pressão horizontal, a equação (3-5), apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial z} \langle u'' w'' \rangle = -\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial p''}{\partial x} \right\rangle + \nu \langle \nabla^2 u'' \rangle = f_D + f_V \quad (3-6)$$

onde  $f_D$  e  $f_V$  são as forças por massa de ar exercidas pelo o arrasto de pressão e viscoso, respectivamente.

No esquema II, primeiro aplica-se uma média no tempo para um ponto único, isto é,  $u_i = \bar{u}_i + u_i'$ , na equação (3-4), e a seguir  $\bar{u}_i$  é substituído por  $\bar{u}_i = \langle \bar{u}_i \rangle + \bar{u}_i''$ , onde as aspas e as aspas duplas representam respectivamente, os operadores de média temporal e espacial. Assim, a equação (3-4) apresenta a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle = & -\frac{1}{\rho} \frac{\langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial \bar{p}''}{\partial x_i} \right\rangle + \\ & + \nu \nabla^2 \langle \bar{u}_i \rangle + \\ & + \nu \langle \nabla^2 \bar{u}_i'' \rangle \end{aligned} \quad (3-7)$$

As diferenças entre as equações (3-7) e (3-5), encontram-se somente na representação dos tensores de Reynolds (Raupach & Thom, 1981). Este tensor extra,  $\langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle$  é uma covariância dispersiva, que surge das correlações espaciais das grandezas médias no tempo, mas que variam espacialmente (Raupach & Thom, 1981).

O segundo e o quarto termos do lado direito da equação (3-7) também representam as influências das forças de arrasto de pressão e viscoso, que podem ser parametrizadas na seguinte forma (Li et al., 1990):

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial \bar{p}''}{\partial x_i} \right\rangle + \nu \left\langle \frac{\partial^2 \bar{u}_i''}{\partial x_j^2} \right\rangle = -C_D A(z) |U| U_i \quad (3-8)$$

### 3.5.1

#### Transferência de Quantidade de Movimento

A transferência de quantidade de movimento da atmosfera para o interior do dossel ocorre devido ao arrasto de pressão e viscoso causado pelos elementos da vegetação. Além disso, essa transferência de quantidade de movimento varia com a espessura da vegetação em associação com o perfil de área foliar. A força de arrasto ( $F_D$ ), imposta pela vegetação no escoamento responsável por essa transferência, pode ser parametrizada na seguinte forma:

$$F_D = \rho C_D A(z) |U| U_i \quad (3-9)$$

onde,  $A(z)$  é a distribuição da densidade de área foliar (DAF) com a altura  $z$  e representa a área frontal das folhas exposta ao vento por unidade de volume.  $C_D$  é o coeficiente de arrasto hidrodinâmico do escoamento do ar sobre a vegetação, devido à força do fluido sobre os elementos da vegetação e  $U_i$  é a velocidade média na direção  $i$ , isto é,  $U_i = \langle \bar{u}_i \rangle$  e  $|U|$  é a magnitude do vetor velocidade do vento, ou seja,  $|U| = (\sum_{i=3}^3 U_i^2)^{1/2}$ .

A arquitetura da planta influencia a força de arrasto, sendo que neste aspecto, destaca-se a área foliar <sup>1</sup>. A área foliar de uma cultura pode ser

<sup>1</sup>Área foliar: superfície da folha exposta à atmosfera.

dada pela soma das áreas de cada folha. Neste caso, um parâmetro muito utilizado é o índice de área foliar (IAF), dado pela relação entre a área das folhas e a área de solo ocupada pela planta. O IAF é dado pela seguinte integral:

$$\text{IAF} = \int_o^{h_f} A(z) dz \quad (3-10)$$

### 3.6

#### Equações de Transporte do Modelo $k - \varepsilon$ Padrão

Neste item são apresentadas as equações do modelo  $k - \varepsilon$  padrão, que foi utilizado nas três metodologias proposta neste trabalho para a modelagem do escoamento sobre regiões de florestas. O modelo  $k - \varepsilon$  foi proposto inicialmente por F.H. Harlow & P.I. Nakayama em 1967 e implementado numericamente por Jones & Launder (1972), com modificações propostas em Launder & Spalding (1972). A base do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  é a aproximação de Boussinesq na qual as tensões de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média. As tensões de Reynolds são expressas da seguinte forma:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (3-11)$$

onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta e  $k$  representa a energia cinética turbulenta. A viscosidade turbulenta é calculada através da seguinte equação:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-12)$$

onde  $C_\mu = 0,09$  é uma constante empírica (Launder & Spalding, 1974).

As equações da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e taxa de dissipação de energia ( $\varepsilon$ ), do modelo  $k - \varepsilon$  padrão em regime permanente são dadas por (Jones & Launder, 1972):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (3-13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3-14)$$

onde  $G_k$  representa a geração da energia cinética turbulenta devido aos gradientes da velocidade média,  $G_b$  é a geração da ECT devido aos efeitos de empuxo,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes de fechamento,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são os termos fontes para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.

Nas equações básicas do modelo os valores das constantes são dados por (Launder & Spalding (1974):  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

O termo  $G_k$  é dado por:

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3-15)$$

O termo  $G_b$  é dado por:

$$G_b = \beta_t g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3-16)$$

onde  $Pr_t = 0,85$  é o número de Prandtl turbulento,  $g_i$  é a componente da aceleração da gravidade na direção  $i$  e  $\beta_t$  é o coeficiente de expansão térmica, definido como:

$$\beta_t = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3-17)$$

Dentro da estrutura do modelo de turbulência modelo  $k - \varepsilon$ , a tensão de Reynolds pode ser modelada de acordo com a seguinte equação (Richards & Hoxey, 1993):

$$-\overline{u'w'} = \mu_t \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3-18)$$

### 3.7 Termos Fontes

Neste trabalho, o modelo  $k - \varepsilon$  padrão foi estendido para incluir termos devido a resistência da árvores. Neste caso, o cálculo do escoamento sobre superfícies vegetadas foi realizado através da inclusão dos termos fontes propostos por Svensson & Häggkvist (1990) nas equações (3-13) e (3-14). É importante destacar que a forma original destas equações é mantida no presente trabalho.

No interior do dossel a influência do arrasto viscoso e do arrasto de pressão (Katul et al., 2004) pode ser modelada através da introdução de

um termo de sumidouro,  $S_u$ , na equação de conservação da quantidade de movimento do um sistema de referência inercial em condições permanentes Batchelor (1967):

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_u \quad (3-19)$$

onde  $p$  é a pressão estática,  $\tau_{ij}$  é o tensor das tensões e  $S_u$  é um termo fonte. O tensor das tensões é dado por:

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3-20)$$

Segundo Svensson & Häggkvist (1990) o termo de sumidouro a ser introduzido na equação (3-19) é dado por:

$$S_u = -\frac{1}{2} \rho C_D A(z) |U| U_i \quad (3-21)$$

O termo fonte  $S_k$  introduzido na equação (3-13) é devido a geração de esteiras turbulentas pelos elementos da vegetação, onde ocorrem transformações da energia cinética do escoamento médio e ECT em energia cinética da esteira ( $\approx C_d A(z) U^3$ ) (Raupach & Shaw, 1982). O modelo para  $S_k$  apresentado por Svensson & Häggkvist (1990) tem a seguinte forma:

$$S_k = \frac{1}{2} C_D \rho A(z) |U| |U|^2 \quad (3-22)$$

O termo fonte para  $S_\varepsilon$  incluído na equação de balanço (3-14) é uma extensão da relação de Kolmogorov (Katul et al., 2004). Segundo o modelo proposto por Svensson & Häggkvist (1990) o termo para  $S_\varepsilon$  é dado por:

$$S_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{k} C_{4\varepsilon} C_D \rho A(z) |U| |U|^2 \quad (3-23)$$

onde,  $C_{4\varepsilon} = 1,95$  é uma constante empírica (Svensson & Häggkvist, 1990).

### 3.8

#### Escoamento sobre Florestas: Meio Poroso

O escoamento no interior da camada do dossel pode ser considerado como um escoamento em um meio poroso (Li et al., 1990; Finnigan, 2000). Para um fluido incompressível a equação da continuidade no interior do meio poroso é dada por:

$$\frac{\partial(\phi u_p)}{\partial x_j} = 0 \quad (3-24)$$

onde  $u_p$  é o vetor velocidade de Darcy. E a equação da quantidade de movimento:

$$\rho \left( \frac{\partial(\phi u_i)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\phi u_i)}{\partial x_j} \right) = -\phi \frac{\partial p}{\partial x_i} + \phi \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_{eff} \frac{\partial(\phi u_i)}{\partial x_j} \right) + S_u \quad (3-25)$$

onde  $\nu_{eff}$  é a viscosidade efetiva.

### 3.8.1

#### Termo Fonte para Meios Porosos

No presente trabalho a predição do escoamento no interior do meio poroso, neste caso a floresta, um termo fonte  $S_u$  é introduzido na equação (3-19). Para um meio poroso homogêneo, este termo fonte é dado por:

$$S_u = - \left( \frac{\mu}{K_p} u_p + C_i \frac{1}{2} \rho u_{pmag} u_p \right) \quad (3-26)$$

onde  $K_p$  é a permeabilidade do meio,  $u_{pmag}$  é a magnitude da velocidade de Darcy e  $C_i$  é o coeficiente de resistência inercial. O primeiro termo no lado direito da equação é o termo de Darcy e representa o efeito do arrasto viscoso. O segundo é o termo de perda inercial (ou termo de Forchheimer) e representa o efeito do arrasto de pressão.

### 3.8.2

#### Porosidade

A porosidade é definida como uma relação entre o volume do ar no volume vazio da camada de vegetação pelo volume total da camada. No presente trabalho as florestas serão consideradas homogêneas, portanto, a porosidade pode ser considerada constante.

A fim de investigar a influência deste parâmetro no padrão do escoamento sobre superfícies vegetadas foram analisadas duas equações diferentes para o cálculo da porosidade. A primeira equação é dada por (Minvielle et al., 2003):

$$\phi = \frac{A_{geo} - \sum A_i}{A_{geo}} \quad (3-27)$$

onde  $A_{geo}$  é a área geométrica perpendicular ao solo na direção do escoamento principal e  $A_i$  é a área frontal dos elementos individuais da vegetação. A Figura (3.6) apresenta uma representação da área frontal efetiva para o

cálculo da porosidade. A segunda equação para o cálculo de  $\phi$  é dada por (Wu et al., 2001):

$$\phi = 1 - \frac{\pi d_a^2 \rho_a}{4} \quad (3-28)$$

onde  $d_a$  é o diâmetro geométrico de uma árvore e  $\rho_a$  é a densidade de árvores por  $m^2$ .

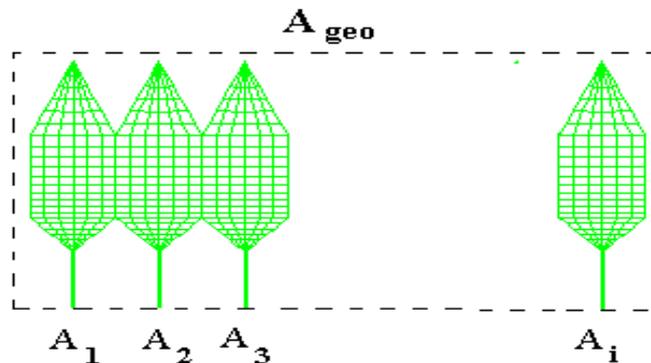


Figura 3.6: Representação da área frontal efetiva para o cálculo da porosidade. Fonte: Adaptada de Wu et al. (2001).

### 3.8.3 Permeabilidade

Neste trabalho a permeabilidade ( $K_p$ ), é calculada através de relações empíricas conhecidas na literatura como equações de Ergun (Nield, 2001). Em termos gerais,  $K_p$  é uma função do número de Reynolds do escoamento (horizontal e vertical), da morfologia da vegetação e de sua orientação em relação ao escoamento.

Para se determinar a permeabilidade na direção horizontal (perpendicular a vegetação) utiliza-se um comprimento de escala característico que corresponde ao próprio diâmetro da vegetação ( $d_v$ ). Na direção vertical (paralela a vegetação) considera-se um comprimento de escala característico o diâmetro hidráulico ( $d_h$ ), dado por (Oldham & Sturman, 2001):

$$d_h = d_v \left( \frac{4(s_v/d_v)^2}{\pi} - 1 \right) \quad (3-29)$$

onde  $s_v$  é a distância entre os elementos da vegetação. A partir dos valores de  $d_v$  e  $d_h$  calcula-se respectivamente, a permeabilidade da vegetação nas

direções horizontal ( $K_{px}$ ) e vertical ( $K_{pz}$ ) ao escoamento. Estas equações são dadas por (Nield, 2001):

$$K_{px} = \frac{\phi^3 d_v^2}{150(1 - \phi)^2} \quad (3-30)$$

$$K_{pz} = \frac{\phi^3 d_h^2}{150(1 - \phi)^2} \quad (3-31)$$

### 3.8.4

#### Coefficiente de Resistência Inercial

Neste trabalho, o coeficiente de resistência inercial para a vegetação nas simulações numéricas do escoamento sobre meios porosos é calculado através da seguinte equação (Nield, 2001):

$$C_i = \frac{1}{2} \frac{\phi F}{\sqrt{K_{pi}}} \quad (3-32)$$

onde  $F$  é a constante de Forchheimer associada ao arrasto de pressão, sendo dada por (Nield, 2001):

$$F = \frac{1,75}{(150)^{(1/2)} \phi^{(3/2)}} \quad (3-33)$$

### 3.9

#### Escoamento sobre Florestas: Elementos Rugosos

Na modelagem do escoamento turbulento sobre elementos rugosos, as árvores serão consideradas elementos rugosos individuais. Um modelo tridimensional (3-D) de floresta baseado nos experimentos de túnel de vento (Novak et al., 2000; Novak et al., 2001) foi construído, a fim de avaliar a influência física das árvores na sub-camada rugosa. A determinação do campo de escoamento nas proximidades de uma árvore ou um de conjunto de árvores é um fator importante nos estudos da engenharia de vento.

Portanto, através dos experimentos numéricos 3-D foram conhecidos detalhes do padrão do escoamento sobre florestas, por exemplo, o comportamento do escoamento turbulento na esteira dos elementos individuais da floresta. Neste caso, não foram introduzidos termos fontes / sumidouro nas equações de conservação da quantidade de movimento, de  $k$  e de  $\varepsilon$  do modelo  $k - \varepsilon$  padrão, equações (3-19); (3-13) e (3-14), respectivamente, ou seja,  $S_u = S_k = S_\varepsilon = 0$ .