

5 Resultados e Discussão

Neste Capítulo são apresentados os resultados dos três procedimentos utilizados nas simulações numéricas do campo de escoamento turbulento sobre os três modelos de florestas em escala reduzida (experimentos de túnel de vento).

5.1 Modelagem 2-D: Inclusão dos Termos Fontes

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas 2-D do escoamento do ar turbulento sobre os modelos de florestas densa, intermediária e esparsa, quando se considera a introdução de termos fontes nas equações de transporte de quantidade de movimento e de k e ε do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão. Todas as variáveis são apresentadas na forma adimensional, após uma normalização com a velocidade de fricção u_* . A velocidade de fricção foi calculada através da expressão: $u_* = (-u'w')^{(1/2)}$, entre $1 \leq z/h_f \leq 2$ e a altura do dossel, h_f .

Para caracterizar o escoamento médio do ar acima e dentro das florestas densa, intermediária e esparsa, as Figuras (5.1); (5.3) e (5.2) apresentam respectivamente, uma comparação entre os perfis verticais da velocidade média do vento experimentais e modelados.

As previsões numéricas dos perfis de velocidade para FD apresentaram boa concordância com os dados experimentais no interior do dossel e nas regiões acima da interface vegetação-atmosfera, conforme mostra a figura (5.1).

Nas simulações numéricas do escoamento sobre FI e FR, também não se observa diferenças significativas entre os valores preditos e experimentais para $(z/h_f > 0,4)$. Entretanto, como pode ser observado nas Figuras (5.3) e (5.2), respectivamente, para FI e FD, nas baixas regiões do dossel $(z/h_f < 0,4)$, os valores preditos foram respectivamente menores que as medições.

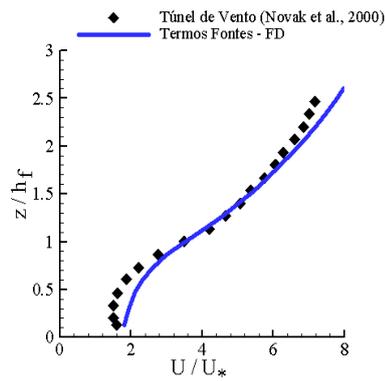


Figura 5.1: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

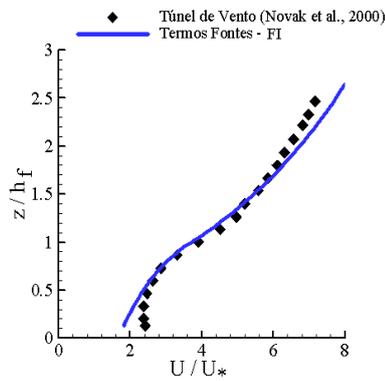


Figura 5.2: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

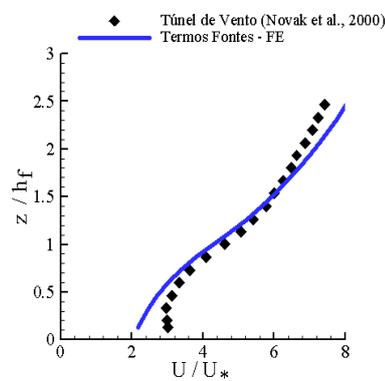


Figura 5.3: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

As Figuras (5.4), (5.5) e (5.6), apresentam os perfis verticais da intensidade da turbulência experimentais e modelados para FD, FI e FE, respectivamente.

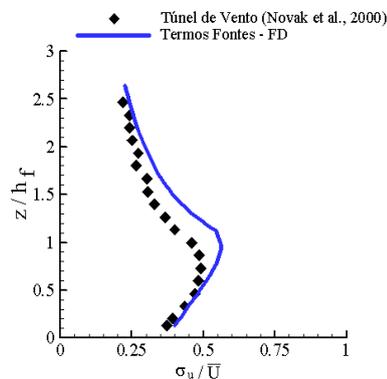


Figura 5.4: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

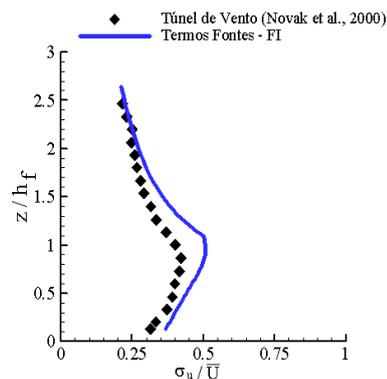


Figura 5.5: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

Os resultados das simulações numéricas obtidas com esta metodologia apresentam boa concordância em relação aos dados experimentais no interior do dossel ($z/h_f < 0,7$), em todos os modelos de florestas em escala reduzida investigados. Nas regiões acima do topo do dossel ($\approx z/h_f > 1,6$), todos os resultados numéricos também apresentaram boa concordância com os valores experimentais, como pode ser observado nas Figuras (5.4); (5.5) e (5.6).

Nas regiões próximas da interface vegetação-atmosfera ($1 < z/h_f < 1,6$), onde ocorre um grande cisalhamento, observa-se pequenas discrepâncias entre os valores numéricos e os experimentais, embora qualitativamente sejam esboçados perfis semelhantes. Portanto, os resultados mostram que esta metodologia conseguiu identificar que os maiores valores de

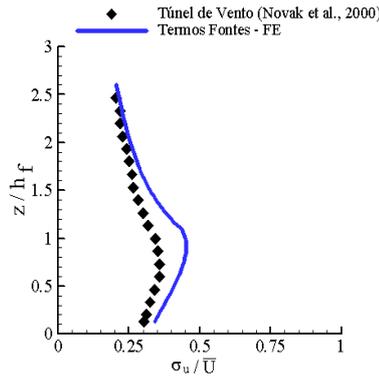


Figura 5.6: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

I_T ocorrem próximos do topo dos dosséis investigados e geralmente decrescem acima e abaixo desta região de acordo com os resultados experimentais apresentados por Novak et al. (2000).

Os resultados numéricos e experimentais não mostraram um aumento significativo da intensidade da turbulência com o aumento da densidade de árvore. Entretanto, segundo Novak et al. (2000) este mesmo comportamento do perfil vertical I_T não foi observado em experimentos de campo para florestas com densidades de árvores diferentes.

Os perfis verticais do componente do tensor de Reynolds ($-\overline{u'w'}$), medidos e modelados para FD, FI e FE, através da metodologia de termos fontes são apresentados nas Figuras (5.7), (5.8) e (5.9), respectivamente.

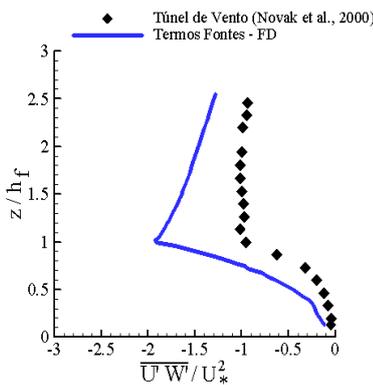


Figura 5.7: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$.

Em todas as simulações numéricas, os valores modelados do componente do tensor de Reynolds foram menores que os dados experimentais. Observando as Figuras (5.7); (5.8) e (5.9) pode se constatar que os resultados numéricos apresentaram grandes discrepâncias nas regiões próximo ao

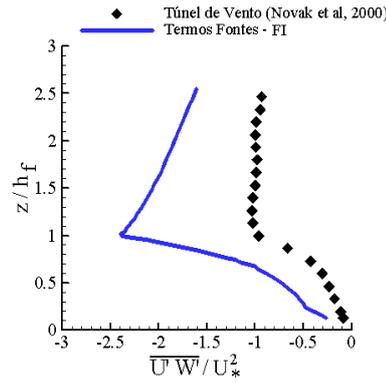


Figura 5.8: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$.

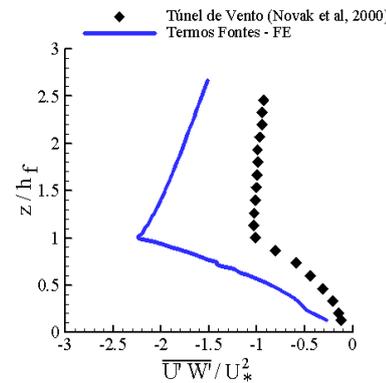


Figura 5.9: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$.

topo ($z / h_f \approx 1$) e acima ($z / h_f > 1$) dos dosséis investigados. Entretanto, eles podem ser considerados razoáveis nas baixas regiões ($\approx z / h_f < 0, 3$).

Estes resultados sugerem que $-\overline{u'w'}$ tende a zero nas baixas regiões de florestas, sendo consistentes com valores obtidos por Wilson & Shaw (1977). Neste trabalho os autores investigaram o componente do tensor de Reynolds com um modelo de fechamento de ordem superior.

A Figura (5.10) mostra os vetores campo de velocidade no interior e acima da superfície vegetação-atmosfera resultantes da simulação numérica sobre FD, entre $x/h_f > 6, 6$ e $z/h_f < 5, 0$. Segundo (Morse et al., 2002) considerou-se que nesta região, o escoamento médio tende a uma condição de equilíbrio homogêneo. Na Figura (5.10), também pode ser observado um padrão característico da camada de mistura de acordo com os estudos realizados em Raupach et al. (1996) e Finnigan (2000). Os resultados das predições numéricas sugerem que a inclusão de termos fontes nas equações de transporte consegue capturar este fenômeno físico do campo de escoamento. No Apêndice C são apresentados estes mesmos resultados para as florestas intermediária e esparsa.

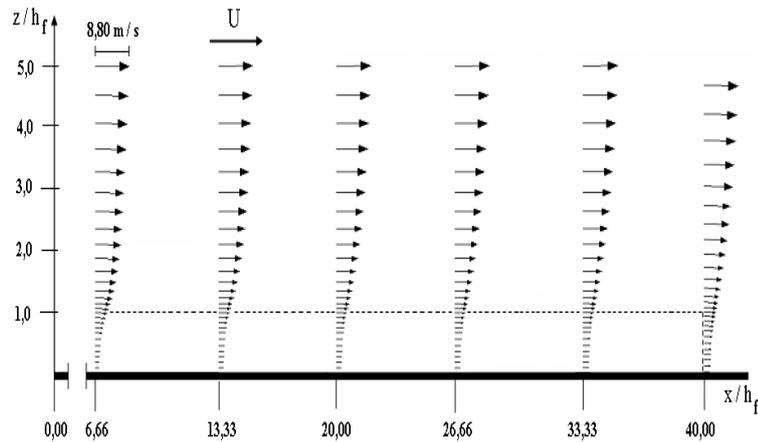


Figura 5.10: Floresta Densa: Vetores campo de velocidade no interior do dossel, na região do equilíbrio interno ($x/h_f \geq 6,6$).

A Figura (5.11) mostra os vetores campo de velocidade do vento na direção principal do escoamento para a floresta densa, quando ocorre a transição da região do dossel para a superfície lisa. Pode ser observado que na esteira próxima da floresta ocorre uma zona de calmaria, caracterizada por baixas velocidades do vento, cuja distância encontra-se em $\approx x = 2,66 h_f$ a jusante do extremo da floresta. Também pode ser observado na Figura (5.11), que ocorre um transporte de quantidade de movimento das altas para baixas camadas, pois a velocidade do vento próxima do solo aumenta progressivamente com o aumento da distância da extremidade da floresta. Além disso, estes resultados sugerem que para distâncias entre $x = 13,33 h_f$ a $x = 26,66 h_f$, o escoamento alcança um condição de equilíbrio, embora o efeito da vegetação ainda pode ser observado.

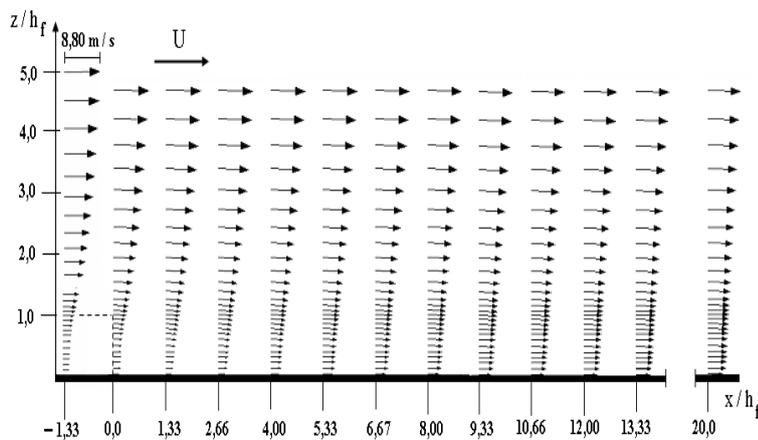


Figura 5.11: Floresta Densa: Vetores campo de velocidade na transição da região do dossel para a superfície lisa.

O resultado obtido no presente trabalho é semelhante ao obtido em

Chen et al. (1995), mostrando um comportamento adequado ao fenômeno físico do campo de escoamento na esteira de florestas, conforme mostra a Figura (5.12). No Apêndice C encontram-se mesmos resultados para as florestas intermediária e esparsa. A Figura (5.12) mostra os resultados do campo de velocidade na região de esteira de uma floresta provenientes de experimentos de túnel de vento. Estes estudos também foram realizados no túnel de vento do Departamento de Engenharia Mecânica da UCB em 1999 (Chen et al., 1995). O modelos de árvores artificiais são idênticos aos modelos considerados no presente trabalho.

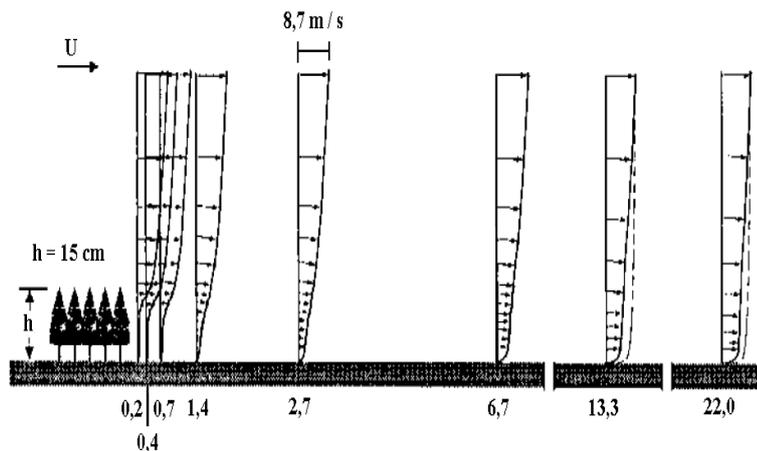


Figura 5.12: Vetores campo de velocidade na transição da região do dossel para a superfície lisa. Fonte: Adaptada de Chen et al. (1995).

5.2

Modelagem 2D: Floresta como um Meio Poroso Homogêneo

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas do escoamento do ar turbulento sobre os modelos de florestas densa, intermediária e esparsa, quando a vegetação foi considerada um meio poroso homogêneo. No presente trabalho considerou-se duas formulações da porosidade que foram comparadas com os resultados experimentais.

A Tabela (5.1) apresenta os parâmetros da vegetação que foram utilizados nas simulações do escoamento sobre FD, FI e FE, respectivamente, quando utilizou-se a seguinte equação (??) (Minvielle et al., 2003).

A Tabela (5.2) apresenta os parâmetros da vegetação que foram utilizados nas simulações do escoamento sobre FD, FI e FE, quando considerou-se a equação (??) (Wu et al., 2001).

Tabela 5.1: Primeira formulação para a porosidade: Parâmetros da vegetação.

Parâmetro	FD	FI	FE
ϕ	0,49	0,68	0,75
K_{px} (m ²)	$5,24 \times 10^{-6}$	$3,28 \times 10^{-5}$	$7,11 \times 10^{-5}$
d_h (m)	0,212	0,584	0,991
K_{pz} (m ²)	$1,47 \times 10^{-4}$	$6,98 \times 10^{-3}$	$4,37 \times 10^{-2}$
F (m ⁻¹)	0,41	0,25	0,22
C_x (m ⁻¹)	44,21	15,14	9,79
C_z (m ⁻¹)	8,33	1,03	0,39

Tabela 5.2: Segunda formulação para a porosidade: Parâmetros da vegetação.

Parâmetro	FD	FI	FE
ϕ	0,84	0,93	0,96
K_{px} (m ²)	$2,59 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$	$6,23 \times 10^{-2}$
d_h (m)	0,212	0,584	0,991
K_{pz} (m ²)	$7,28 \times 10^{-3}$	$3,83 \times 10^{-1}$	3,83
F (m ⁻¹)	0,18	0,16	0,15
C_x (m ⁻¹)	9,67	3,49	1,84
C_z (m ⁻¹)	1,82	0,24	0,07

Nas Figuras (5.13), (5.14) e (5.15), respectivamente, tem-se uma comparação entre os perfis verticais da velocidade experimentais e numéricos para FD, FI e FE.

No caso da floresta densa, para $\phi = 0,49$, os valores preditos apresentaram boa concordância com os dados experimentais no interior do dossel ($z/h_f < 1$), porém nas regiões acima da interface vegetação-atmosfera, os valores preditos foram menores. Com o aumento da porosidade, $\phi = 0,84$, observa-se que os valores preditos no interior do dossel ($z/h_f < 1$) tornam-se maiores que os experimentais, porém, para $z/h_f > 1$ obteve-se uma boa concordância, como mostra a Figura (5.13).

Nas simulações numéricas do escoamento sobre a floresta intermediária, para $\phi = 0,68$, obteve-se uma excelente concordância entre os resultados numéricos e os dados experimentais, no interior e acima da região de floresta. Quando considerou-se $\phi = 0,93$, as predições numéricas foram maiores que os valores experimentais no interior da floresta, como mostra a Figura (5.14). Entretanto, nas regiões acima do topo dossel, obtém-se uma boa concordância entre os valores numéricos e experimentais.

Nas simulações do escoamento sobre a floresta esparsa, os resultados preditos dos perfis verticais da velocidade do vento no interior do dossel

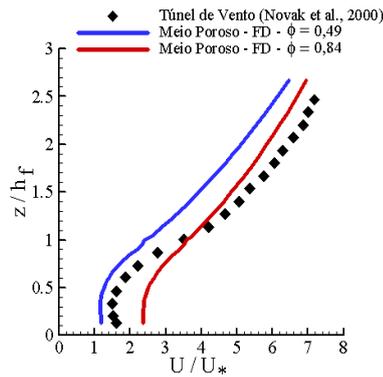


Figura 5.13: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

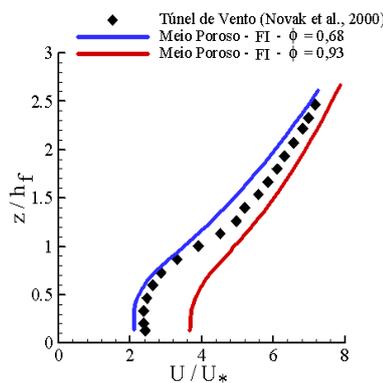


Figura 5.14: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

foram menores que os dados experimentais para $\phi = 0,75$ e maiores quando utilizou-se $\phi = 0,96$. Nas regiões acima da copa, os valores preditos foram menores que os valores experimentais para $\phi = 0,75$, enquanto que quando empregou-se $\phi = 0,96$ os valores preditos dos perfis de velocidade apresentaram boa concordância com os dados experimentais, conforme mostra a Figura (5.15).

As Figuras (5.16), (5.17) e (5.18), respectivamente, mostram uma comparação entre os perfis verticais da intensidade da turbulência experimentais e preditos para FD, FI e FE. Em todas as simulações numéricas, os resultados sugerem que houve uma significativa influência da porosidade no cálculo da intensidade da turbulência.

Quando se considera o modelo de floresta densa, para $\phi = 0,49$ no interior e acima do dossel os valores preditos foram significativamente maiores que os experimentais. Para $\phi = 0,84$, os valores preditos da intensidade da turbulência apresentam boa concordância com os dados experimentais no interior do dossel, porém, nas regiões acima da interface vegetação-atmosfera, as predições foram maiores que as medições, como

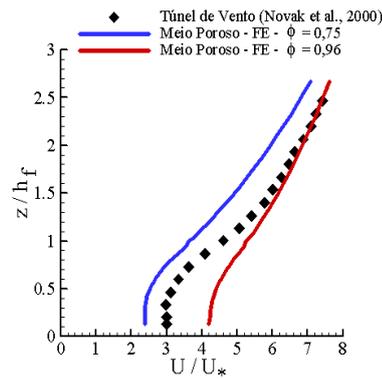


Figura 5.15: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

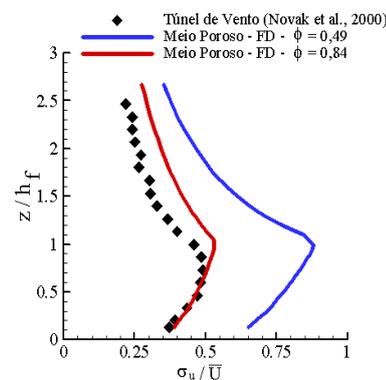


Figura 5.16: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

mostra a Figura (5.16).

Nas simulações numéricas do escoamento sobre a floresta intermediária, pode ser observado na Figura (5.17) que para $\phi = 0,68$ as predições da intensidade da turbulência foram maiores que os valores experimentais, ocorrendo uma grande discrepância no topo do dossel. Para $\phi = 0,93$, observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, conforme mostra a Figura (5.17). Para a floresta esparsa, observa-se o mesmo comportamento, ou seja, para $\phi = 0,75$ ocorrem significativas diferenças entre valores preditos e experimentais e com o aumento da porosidade para $\phi = 0,93$, obtém-se boa concordância, conforme mostra a Figura (5.18).

As Figuras (5.19), (5.20) e (5.21), apresentam uma comparação entre os perfis experimentais e preditos do componente do tensor de Reynolds ($-\overline{u'w'}$), para os três tipos de densidades de árvores investigados.

É importante destacar que para o cálculo de $-\overline{u'w'}$ em meios porosos, foi utilizado a seguinte formulação: $-\rho\phi u'w'$, denominado de tensor de Reynolds macroscópico (Lemos & Silva (2005)). Em todas as simulações

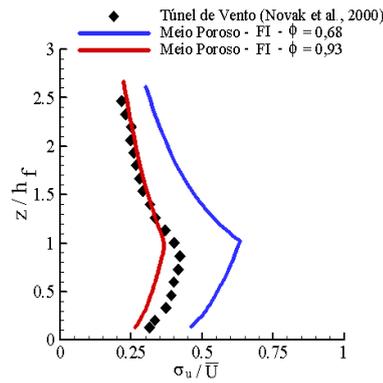


Figura 5.17: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

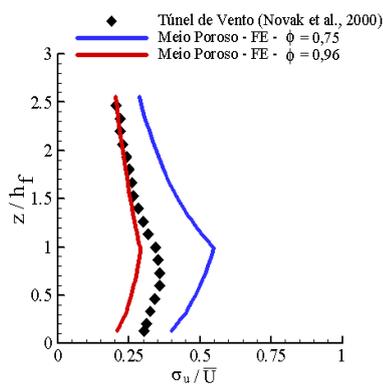


Figura 5.18: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais da intensidade da turbulência.

numéricas, nas regiões acima da interface vegetação-atmosfera, os valores obtidos de $-\overline{u'w'}$ foram significativamente menores que os valores experimentais. Nas baixas regiões do dossel ($z < 0,3 h_f$), observa-se uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais. Além disso, nota-se nas Figuras (5.19), (5.20) e (5.21), que em todas as simulações numéricas a influência do aumento da porosidade da vegetação é mais pronunciada nas regiões próximas ao topo da copa aproximadamente em $z > 0,8 h_f$ e nas regiões acima do dossel.

A Figura (5.22) mostra os vetores campo de velocidade no interior e acima da superfície vegetação-atmosfera resultantes da simulação numérica da FD, quando adotou-se $\phi = 0,84$ em $x/h_f > 6,6$ e $x/h_f < 40,0$, e $z/h_f < 5,0 h_f$. Como pode ser observado, o escoamento médio tendeu a uma condição de equilíbrio homogêneo no interior e acima do dossel.

A Figura (5.23) mostra os vetores campo de velocidade na direção principal do escoamento para a florestas densa, quando ocorre a transição da região do dossel para a superfície lisa. Neste caso, também pode ser observado a formação da zona de calmaria na esteira próxima da floresta,

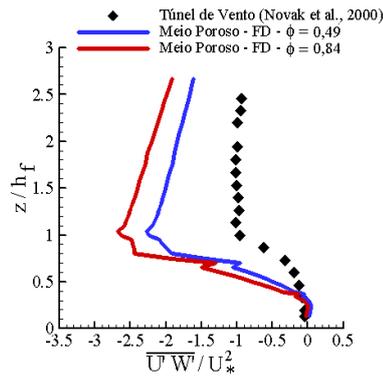


Figura 5.19: Floresta Densa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$.

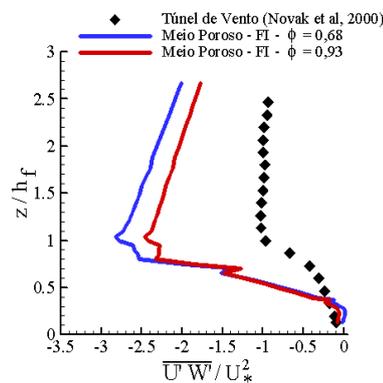


Figura 5.20: Floresta Intermediária: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$.

cuja distância encontra-se em aproximadamente $x = 1,33 h_f$ a jusante do extremo da floresta. Além disso, pode ser observado na Figura (5.23), que ocorre um transporte de quantidade de movimento das altas para baixas camadas. Este resultado obtido no presente trabalho pode ser considerado semelhante ao obtido por Chen et al. (1995). Estes mesmos resultados para as florestas intermediária e esparsa encontram-se no Apêndice III.

5.3

Resultado da Modelagem 3-D do Escoamento sobre a Floresta

Os resultados a serem apresentados nesta seção referem-se às simulações numéricas 3-D para os modelos de floresta intermediária e esparsa. No domínio computacional, construiu-se um modelo de árvore com geometria aproximadamente igual a árvore utilizada nos experimentos de túnel de vento. Entretanto, na análise experimental foram utilizadas árvores com diâmetro de 0,001 cm e na análise experimental foram construídas árvores com tronco quadrado de 1 cm de lado. Esta geometria foi considerada de-

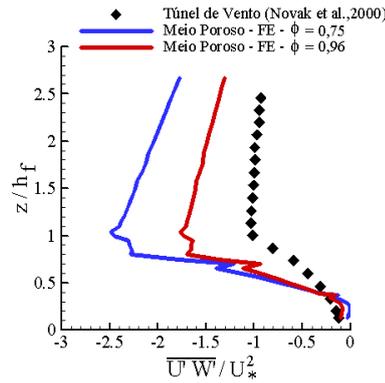


Figura 5.21: Floresta Esparsa: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos de $-\overline{u'w'}$.

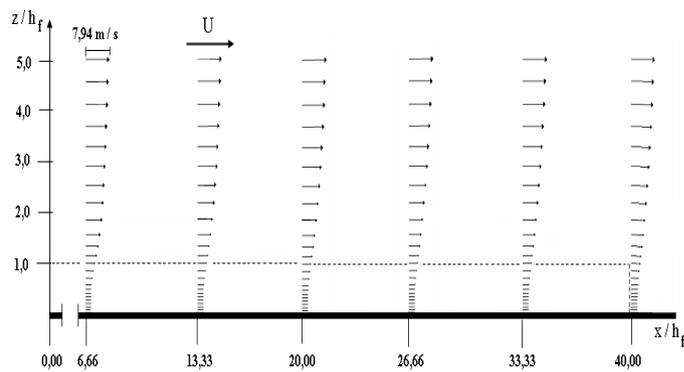


Figura 5.22: Floresta Densa: Vetores campo de velocidade no interior do dossel, na região do equilíbrio interno ($x/h_f \geq 6,6$).

vido a problemas de razão de aspecto que surgiam na construção da malha computacional, quando utiliza-se árvores com lados menores que 1 cm. Dois diferentes ângulos de incidência do escoamento foram investigados: (a) escoamento normal a superfície das árvores, ($\theta_i = 0^\circ$) e (b) $\theta_i = 45^\circ$. Não foram realizadas simulações numéricas da floresta densa. Neste caso seria necessário construir aproximadamente 900 modelos de árvores, considerando uma condição de simetria do túnel de vento, visando representar a densidade de árvores neste experimento ($125 \text{ árvores m}^{-2}$). Isto exigiria um alto custo computacional na construção da malha.

As Figuras (5.24) e (5.25), mostram uma comparação entre os resultados experimentais e modelados dos perfis verticais da velocidade média para FI e FE, respectivamente.

Através da Figura (5.25) pode se observar que para a floresta esparsa, esta metodologia reproduziu bem o perfil da velocidade do vento nas regiões acima do topo das árvores para um ângulo de incidência $\theta_i = 45^\circ$. Entretanto, este mesmo comportamento não foi observado para $\theta_i = 0^\circ$. No interior do dossel em todas as simulações numéricas os valores preditos foram

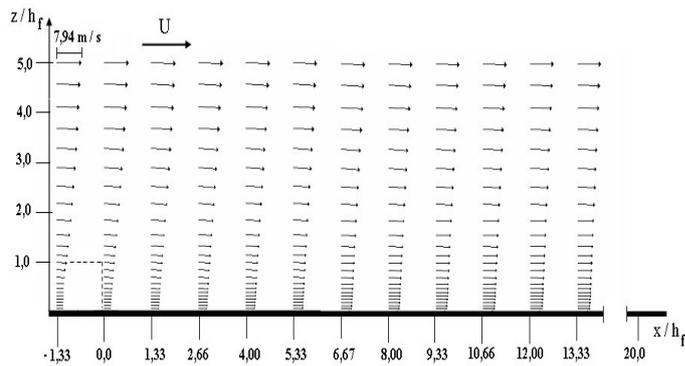


Figura 5.23: Floresta Densa: Vetores campo de velocidade na transição da região do dossel para a superfície lisa.

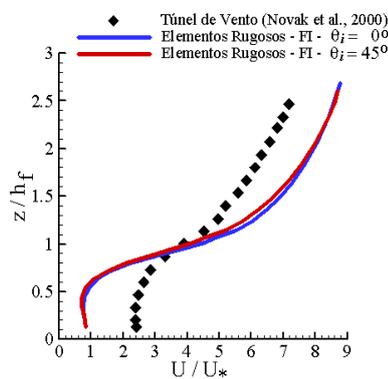


Figura 5.24: Floresta Intermediária: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

significativamente menores que os valores experimentais. Os resultados também sugerem que para $z < h_f$ não houve uma significativa influência dos dois ângulos de ataques considerados nos perfis verticais da velocidade do vento, conforme mostram as figuras (5.24) e (5.25).

As Figuras (5.26) e (5.27) mostram uma comparação entre os resultados experimentais e preditos dos perfis verticais da intensidade da turbulência, respectivamente, para FI e FE.

Pode-se observar que os valores numéricos da intensidade da turbulência foram menores que os valores experimentais no interior do dossel ($\approx z/h_f < 1$), em todos os casos estudados. Nas regiões acima do topo do dossel, em aproximadamente ($z/h_f > 0,8$), para a floresta esparsa observa-se uma razoável concordância com os dados experimentais para $\theta_i = 0^\circ$ e $\theta_i = 45^\circ$, conforme mostra a Figura (5.27). No caso da floresta intermediária, estes resultados foram significativamente menores, conforme mostra a Figura (5.26). Além disso, os cálculos da intensidade da turbulência não foram afetados pelos dois ângulos de ataques do escoamento investigados, conforme mostram as (5.26) e (5.27).

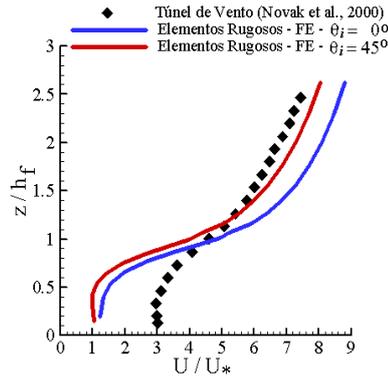


Figura 5.25: Floresta esparsa: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis verticais da velocidade média do vento.

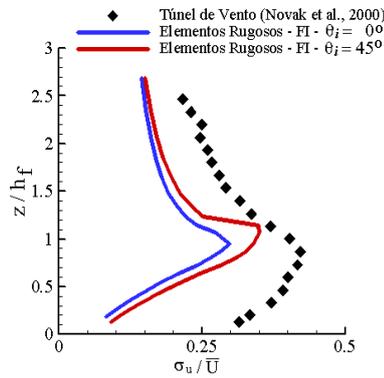


Figura 5.26: Floresta Intermediária: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis 3-D da intensidade da turbulência.

As Figuras (5.28) e (5.29) mostram uma comparação entre os resultados preditos e experimentais dos perfis verticais do componente do tensor de Reynolds para FI e FE, respectivamente.

Em todas as simulações numéricas os resultados sugerem os valores previstos do tensor de Reynolds apresentaram boa concordância em relação aos dados experimentais. É importante observar nas figuras (5.28) e (5.29), que abaixo de $z/h_h < 0,5$, as magnitudes dos valores numéricos e experimentais de $-\overline{u'w'}$ foram menores que seus valores nas regiões próximas do topo do dossel. Neste caso também não houve uma influência dos ângulos de ataque nos perfis verticais de $-\overline{u'w'}$. Além disso, conforme observado nas metodologias de termos fontes e meios porosos, para este tipo de escoamento, $-\overline{u'w'}$ tende a zero nas baixas regiões das florestas.

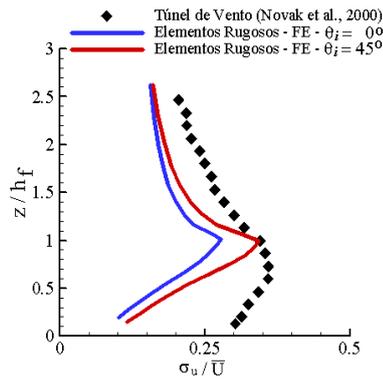


Figura 5.27: Floresta Esparsa: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis 3-D da intensidade da turbulência.

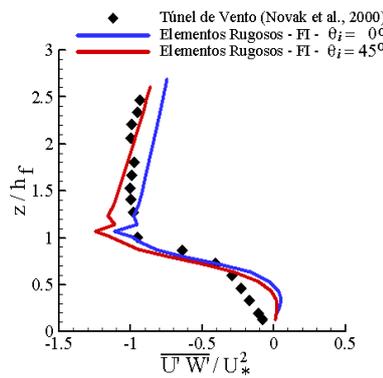


Figura 5.28: Floresta Intermediária: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis 3-D de $-\overline{u'w'}$.

5.4 Campo de Escoamento Tridimensional

Nesta seção apresenta-se os resultados das simulações numéricas 3-D do escoamento no interior da camada limite do dossel para a floresta intermediária. As Figuras (5.30) e (5.31), mostram os resultados da simulação numérica do vetor campo de velocidade próximo de um conjunto de árvores, no plano horizontal $x - y$ com $z = h_f / 2$, respectivamente, para $\theta_i = 0^\circ$ e $\theta_i = 45^\circ$. No Anexo III encontram-se os resultados das simulações do campo de escoamento dentro e sobre a floresta esparsa.

A fim de obter uma visão detalhada da complexa estrutura do campo de velocidade nas proximidades de uma árvore, as Figuras (5.32) e (5.33), apresentam os vetores campo de velocidade para a floresta intermediária, no plano horizontal $x - y$ para $z = h_f / 2$, respectivamente, para $\theta_i = 0^\circ$ e $\theta_i = 45^\circ$.

Qualitativamente, pode ser observado nas Figuras (5.32) e (5.33), que o escoamento de fluido ao incidir na face frontal de uma árvore foi

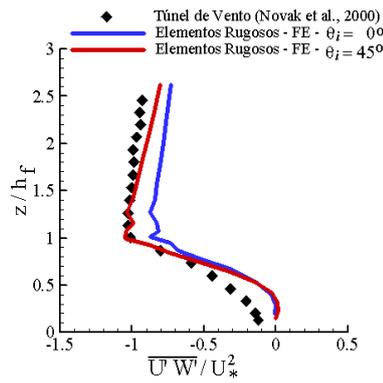


Figura 5.29: Floresta Esparsa: Comparação entre os valores medidos e numéricos dos perfis 3-D de $-\overline{u'w'}$.

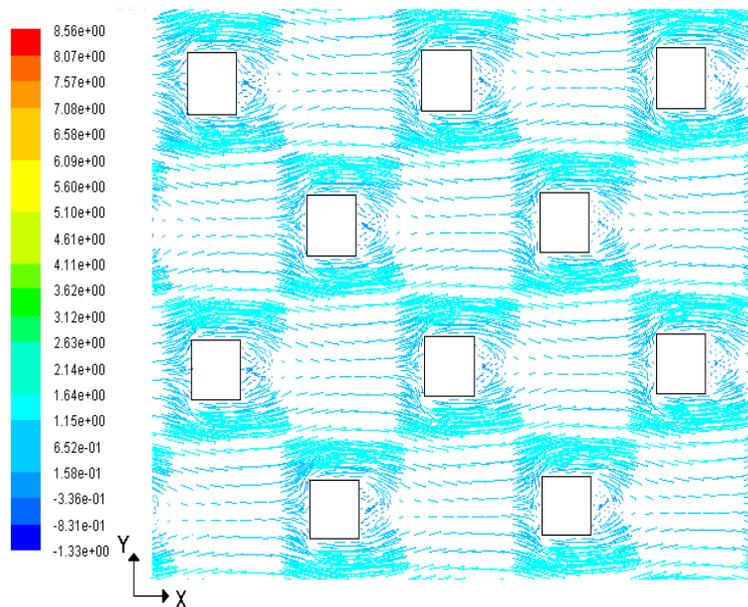


Figura 5.30: Floresta intermediária ($\theta = 0^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de um conjunto de árvores (plano $x - y$ com $z = h_f / 2$).

desacelerado e que parte da quantidade de movimento na direção principal foi transformada em quantidade de movimento lateral. O escoamento reverso que se forma na região de esteira próxima de uma árvore pode ser claramente notado no campo de velocidade, esta região se estende de $x \approx 0,021 h_f$ para $\theta_i = 0^\circ$ e $x \approx 0,018 h_f$ para $\theta_i = 45^\circ$. Esta região é caracterizada por baixas velocidades e movimentos circulares intensos. Consequentemente, para os dois ângulos de incidência do escoamento pode ser observada a formação de um par de vórtices simétricos, conforme mostram as Figuras (5.32) e (5.33). É importante notar que existe um gradiente vertical da velocidade média lateral, supostamente devido aos efeitos de parede das árvores, que foram tratadas como elementos rugosos individuais.

Para a floresta intermediária os vetores campo de velocidade ao redor

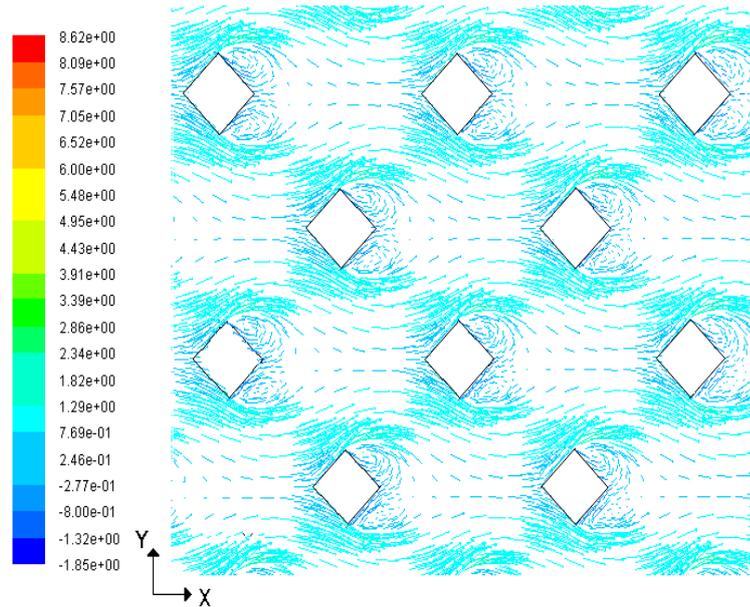


Figura 5.31: Floresta intermediária ($\theta = 45^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de de um conjunto de árvores (plano $x - y$ com $z = h_f/2$).

do plano central de uma árvore no plano vertical $x - z$ são mostrados nas Figuras (5.34) e (5.35), respectivamente para $\theta_i = 0^\circ$ e $\theta_i = 45^\circ$. Os resultados numéricos sugerem que parte do escoamento de fluido que incide na região frontal da árvore é orientado baixo. A outra parte do campo de escoamento, que se dirige para cima, gera uma separação da camada limite no topo da árvore. Estes resultados sugerem que um ponto de estagnação pode ocorrer a aproximadamente $z/h_f = 0,70$ m na face frontal da árvore.

As Figuras (5.36) e (5.37) apresentam os contornos da energia cinética turbulenta a jusante da região de transição da superfície plana para a superfície rugosa no plano $x - y$ para $z = 0,5 h_f$, respectivamente, para as florestas intermediária e esparsa. Pode ser observado que ocorre um rápido decréscimo da ECT na transição da superfície plana para a rugosa para as duas densidades de floresta investigadas, conforme mostram as Figuras (5.36) e (5.37). Este comportamento sugere que o escoamento do ar sofre uma forte desaceleração ao penetrar no dossel devido a ação das forças de arrasto, na região de distorção do escoamento. Os parâmetros turbulentos ajustam-se a esta condição entre $x = 2 h_f$ a $x = 3 h_f$ (Morse et al., 2002).

As predições numéricas do escoamento que este comportamento ocorre em aproximadamente $x = 2 h_f$ e $x = 3,5 h_f$, respectivamente, para as florestas intermediária e esparsa. Pode ser observado também que a ECT tende a zero na metade da altura do dossel $z = 0,5 h_f$, na região que ocorre o início do ajustamento da turbulência em relação a região em que ocorre a distorção do escoamento devido a presença da vegetação.

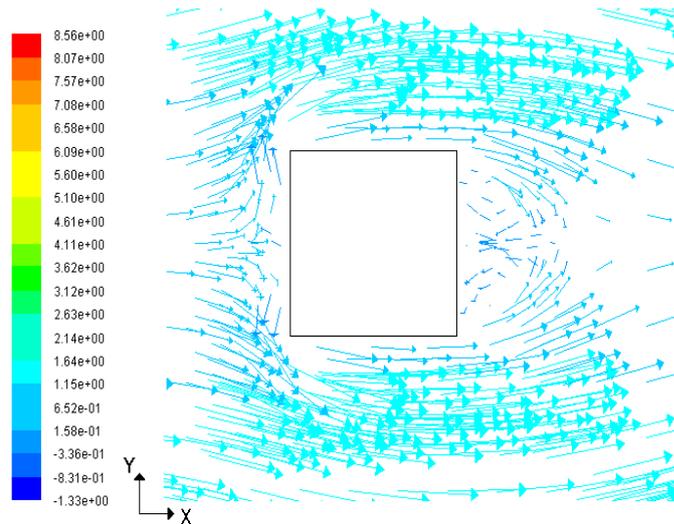


Figura 5.32: Floresta intermediária ($\theta = 0^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de uma árvore, (plano $x - y$ com $z = h_f / 2$).

É importante destacar, a partir da análise destes resultados, que quando o escoamento choca-se contra a superfície frontal de uma floresta, a presença da vegetação causa fortes mudanças no campo de velocidade e afeta a estrutura do escoamento turbulento.

5.5 Análise dos Resultados

5.5.1 Perfis Verticais da Velocidade do Vento

No presente trabalho, realizou-se previsões numéricas do escoamento turbulento dentro e acima de três modelos de florestas em escala reduzida, caracterizadas por três diferentes densidade de árvores m^2 , adotando-se três métodos distintos. Os resultados sugerem que qualitativamente os três procedimentos adotados conseguiram capturar os principais fatores do perfil vertical de velocidade, dentro e acima de um dossel de floresta. Foram reproduzidos os seguintes fatores:

- (I) O ponto de inflexão do perfil de velocidade médio no topo do dossel;
- (II) Um decaimento exponencial da velocidade do vento nas regiões abaixo da interface vegetação-atmosfera, ($z/h_f < 1$), devido aos efeitos da força de arrasto, conduzindo a baixas velocidades no interior do dossel.
- (III) O perfil logarítmico padrão da velocidade do vento nas regiões acima do topo das árvores ($z/h_f > 1$);

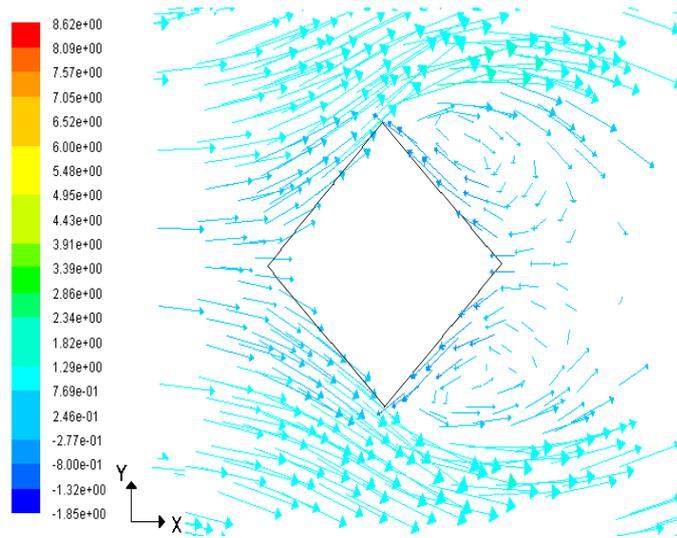


Figura 5.33: Floresta intermediária ($\theta = 45^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de uma árvore, (plano $x - y$ com $z = h_f / 2$).

Quantitativamente para a floresta densa ($\rho_a = 125$ árvores m^{-2}), a modelagem por termos fontes apresentou boa concordância com os resultados experimentais. Estes resultados foram semelhantes aos reportados em Raupach et al. (1996) e Finnigan (2000), para diferentes tipos de vegetação. Em relação as florestas intermediária e esparsa, nas baixas regiões do dossel ($z/h_f < 0,4$), os resultados da velocidade do vento médio modelados foram menores que os valores experimentais. Para regiões acima de ($z/h_f > 0,4$) os valores obtidos da análise computacional têm um comportamento praticamente igual aos obtidos da análise experimental.

Quando se considerou a floresta como um meio poroso homogêneo, foram usadas duas formulações para o cálculo da porosidade nos três modelos de florestas investigados. Para o maior valor de ϕ os resultados modelados e experimentais apresentaram boa concordância nas regiões acima do topo da copa. Para $z/h_f < 1,0$, foram observadas discrepâncias entre as análises numéricas e experimentais. Para o menor valor de ϕ não foram verificadas significativas diferenças entre as análises numérica e experimental, nas regiões acima e abaixo da interface vegetação-atmosfera para os três valores de densidade de árvore. Para o maior valor de ϕ a modelagem por meio poroso apresenta os melhores resultados dos perfis verticais da velocidade do vento, independentemente do valor de ρ_a considerado.

Na metodologia de elementos rugosos, todos os perfis verticais do vento médio apresentaram grandes discrepâncias nas baixas regiões dos dosséis, nos modelos de florestas intermediária e esparsa. Para $z/h_f > 1$, não foram observados diferenças significativa entre os resultados numéricos e obtidos

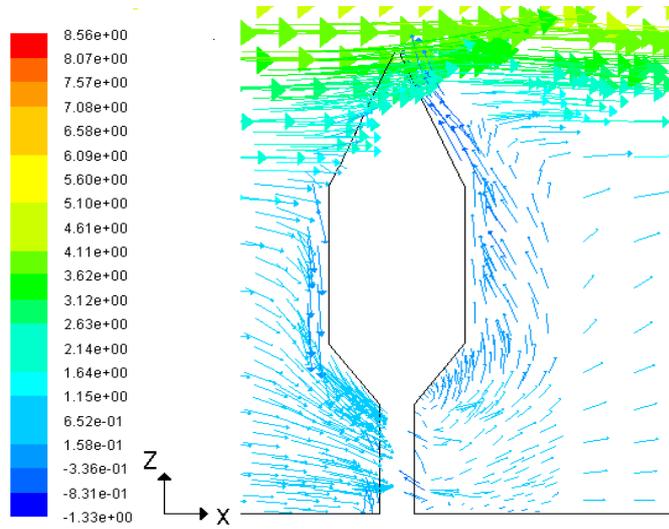


Figura 5.34: Floresta intermediária ($\theta = 0^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de uma árvore (plano $x - z$).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0221011/CA

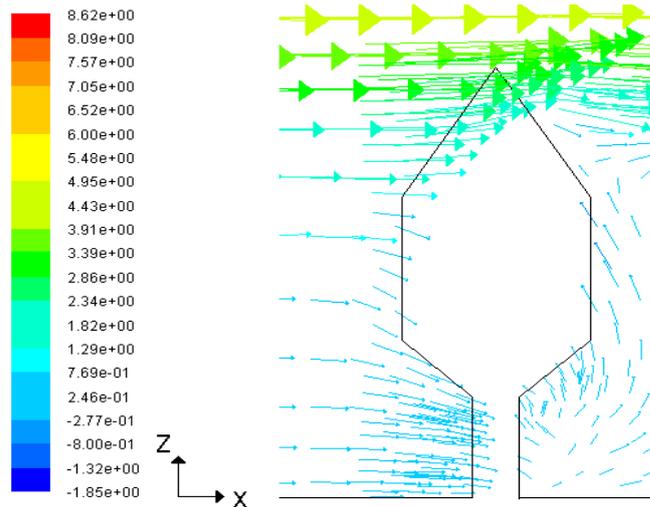


Figura 5.35: Floresta intermediária ($\theta = 45^\circ$): Vetores campo de velocidade nas proximidades de uma árvore (plano $x - z$).

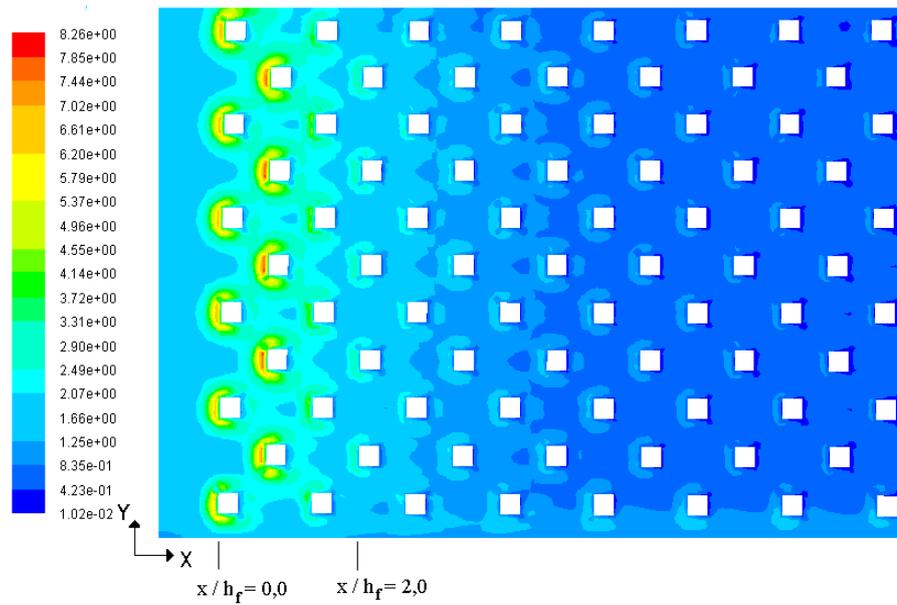


Figura 5.36: Floresta intermediária ($\theta = 0^\circ$): Contorno da energia cinética turbulenta a jusante da região de transição da superfície lisa para rugosa (plano $x - y$).

experimentalmente.

5.5.2 Perfis Verticais da Intensidade da Turbulência

A fim de obter um melhor entendimento da turbulência dentro e acima dos modelos de florestas investigados, foi utilizado um momento estatístico de segunda ordem, ou seja, a intensidade da turbulência. Quantitativamente, todas as metodologias conseguem capturar um perfil da intensidade da turbulência, típico dos escoamentos no interior de dosséis.

Quantitativamente, os resultados sugerem que a introdução dos termos fontes nas equações de transporte apresentam melhores resultados em relação aos outros dois procedimentos adotados. Quando se considerou a vegetação como um meio poroso homogêneo, para o menor valor da porosidade, ocorreu uma superestimativa da intensidade da turbulência, nas regiões acima e abaixo do dossel, porém, com o aumento da porosidade, os resultados apresentam boa concordância com os dados experimentais. Na metodologia de elementos rugosos, no interior da floresta, as previsões numéricas foram significativamente menores que os valores experimentais.

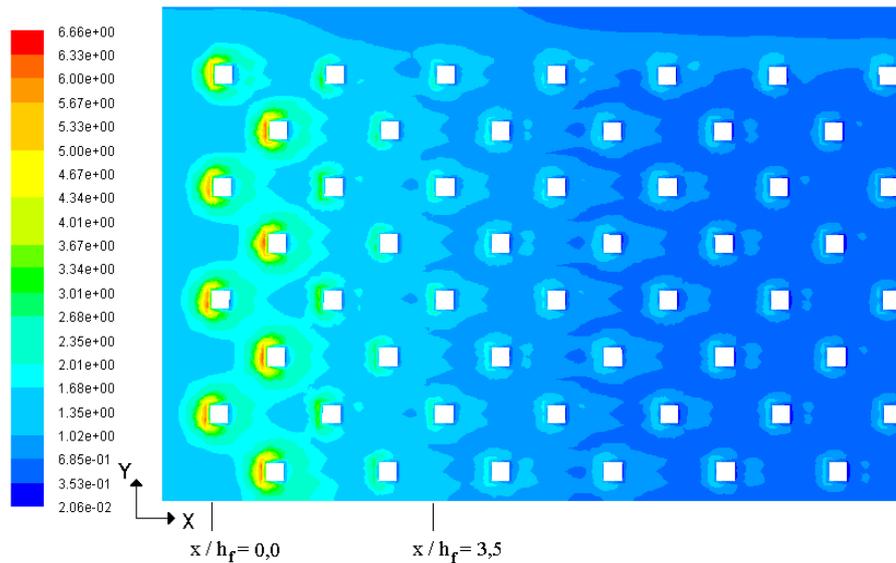


Figura 5.37: Floresta esparsa ($\theta = 0^\circ$): Contorno da energia cinética turbulenta a jusante da região de transição da superfície lisa para rugosa (plano $x - y$).

5.5.3

Perfis Verticais do Componente do Tensor de Reynolds

Os resultados também sugerem que as previsões numéricas do componente do tensor de Reynolds foram quantitativamente melhores quando se considerou as árvores como obstáculos individuais. Na metodologia de termos fontes e meios porosos estes resultados foram significativamente menores. Qualitativamente, ambas as metodologias reproduziram o comportamento dos tensor de Reynolds do escoamento sobre superfícies vegetadas.

Uma possível explicação para este fato é que a base do modelo $k-\varepsilon$ é a aproximação de Boussinesq, na qual, assume-se que $-\overline{u'w'}$ são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta. Como o modelo considera a isotropia para a viscosidade turbulenta, isto implica que o modelo é incapaz de prever qualquer forte anisotropia da turbulência que poderia existir na região do dossel.

5.5.4

Analogia com a Camada de Mistura

Raupach et al. (1996) consideraram que as várias características do escoamento sobre dosséis são semelhantes as de uma camada de mistura, incluindo o ponto de inflexão no perfil vertical da velocidade do vento. No

presente trabalho, considerando todos os resultados dos perfis verticais da velocidade do vento, pode-se observar que as três metodologias adotadas apresentam este ponto de inflexão. Entretanto, torna-se necessário uma análise mais detalhada destes resultados, a fim de verificar se realmente a camada do dossel apresenta as características de uma camada de mistura.

O primeiro parâmetro investigado foi a escala de comprimento do cisalhamento do vento (L_s) que corresponde a metade da espessura de vorticidade na CM. Valores de L_s foram calculados para os três diferentes modelos de floresta e comparados com os resultados experimentais. A Tabela (5.3) apresenta os resultados da escala de comprimento de cisalhamento do vento, L_s , para as três diferentes metodologias utilizadas neste trabalho.

Na metodologia de termos fontes, para floresta densa o valor L_s , foi 22 % maior que o valor experimental e para a floresta esparsa um valor 0,15 % menor. Para a floresta intermediária os resultados preditos e experimentais apresentaram forte concordância.

Na metodologia de meios porosos para os menores valores da porosidade adotados, os resultados foram 22 %, 27 %, e 5 % maiores que os experimentais, respectivamente, para FD, FI e FE. Com o aumento da porosidade, em todas as simulações numéricas, os valores de L_s foram significativamente maiores que as medições. E finalmente, quando considerou-se as árvores como obstáculos individuais, os valores de L_s foram significativamente menores que os experimentais, para ambos os ângulos de ataque considerados. O ponto de cisalhamento máximo ocorreu no topo da copa, em todas as simulações numéricas, entretanto, nos experimentos de túnel de vento este ponto ocorreu um pouco abaixo do topo, exceto para o caso da floresta esparsa (Novak et al., 2000).

Tabela 5.3: Escala de comprimento de cisalhamento do vento.

	FD	FI	FE
Experimental	0,098	0,130	0,187
Termos Fontes	0,120	0,132	0,162
Meio Poroso ϕ_1	0,120	0,166	0,196
Meio Poroso ϕ_2	0,198	0,298	0,399
Elementos Rugosos $\theta = 0^\circ$	-	0,088	0,099
Elementos Rugosos $\theta = 45^\circ$	-	0,061	0,099

Os perfis da velocidade média dos escoamentos que contém um ponto de inflexão devem apresentar um perfil típico de uma tangente hiporbólica, característico de uma camada de mistura (Holmes et al., 1996). Quantita-

tivamente este perfil é dado por:

$$\frac{U - \bar{U}}{\Delta U} = 0,5 \tanh\left(\frac{z - \bar{z}}{2\theta}\right) \quad (5-1)$$

onde U_1 e U_2 , são respectivamente as baixas e altas velocidades da CM, $\Delta U = U_2 - U_1$, $\bar{U} = 1/2(U_1 + U_2)$ é a velocidade aritmética entre U_1 e U_2 . O parâmetro \bar{z} é altura na qual $U = \bar{U}$ e o ângulo θ é definido como:

$$\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{U - \bar{U}}{\Delta U} \right)^2 \right] dz \quad (5-2)$$

Para a metodologia de termos fontes, uma comparação entre os perfis de velocidades previstos e de uma tangente hiperbólica da camada de mistura encontram-se plotados nas Figuras (5.38), (5.39) e (5.40), respectivamente, para FD, FI e FE. Quando a floresta foi tratada como um meio poroso homogêneo estes perfis são apresentados nas Figuras (5.41), (5.42) e (5.43). Estes perfis foram ajustados para a velocidade e altura da camada de mistura média, respectivamente, (\bar{U} e \bar{z}), definidos nas equações (5-1) e (5-2), sendo normalizados por ΔU e pela espessura da quantidade de movimento (θ).

Pode ser observado que as predições numéricas dos perfis de velocidade estão em concordância com o perfil da tangente hiperbólica, confirmando assim a validade da analogia da camada de mistura para escoamento sobre dosséis. Em vista dos resultados obtidos, pode-se considerar que ambas as metodologias estão em condições de simular o campo de escoamento sobre superfícies vegetadas.

Quando se considerou as árvores como elementos rugosos 3-D, o modelo $k - \varepsilon$ padrão não apresentou bons resultados da escala de comprimento de cisalhamento do vento. Além disso, foram obtidos uma comparação entre os perfis de velocidade do vento com a tangente hiperbólica da camada de mistura, . Portanto, no geral as predições do modelo nas simulações numéricas 3-D, não foram satisfatórias . Uma das possíveis explicação para estes resultados pode ser atribuída a forma geométrica dos modelos de árvores nas baixas regiões do dossel. Pois nos experimentos foram utilizadas árvores com diâmetro de 0,001 cm e no domínio computacional foram construídas árvores com tronco quadrado de 1 cm de lado.

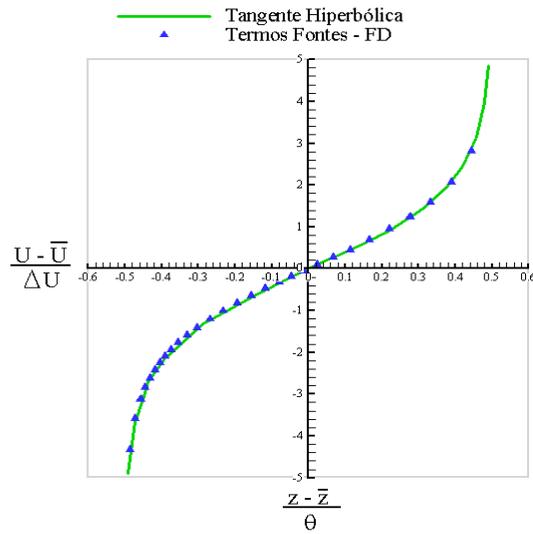


Figura 5.38: Floresta Densa: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de termos fontes. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.

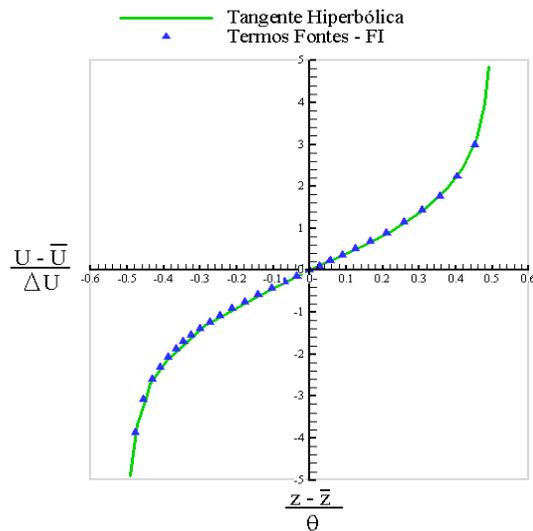


Figura 5.39: Floresta Intermediária: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de termos fontes. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.

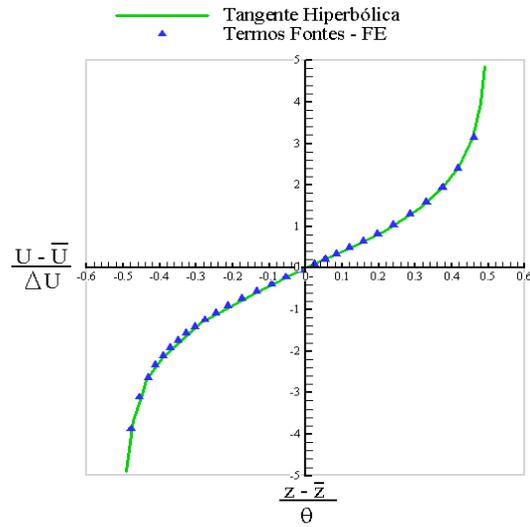


Figura 5.40: Floresta Esparsa: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de termos fontes. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.

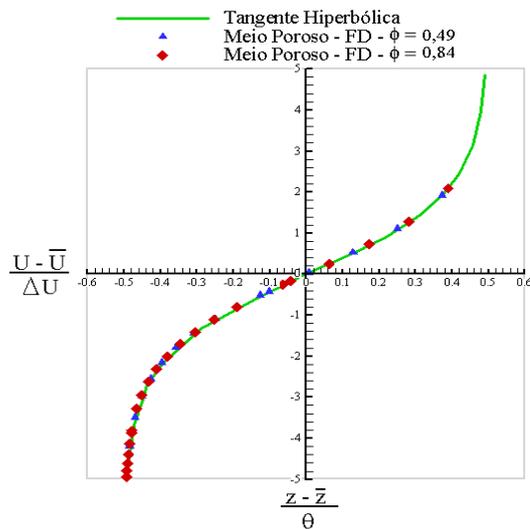


Figura 5.41: Floresta Densa: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de meios porosos. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.

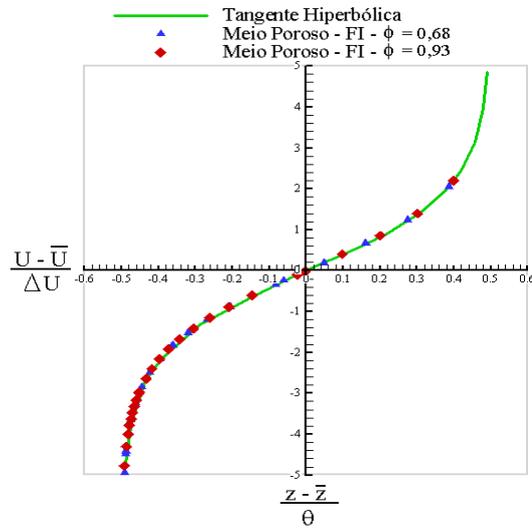


Figura 5.42: Floresta Intermediária: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de meios porosos. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.

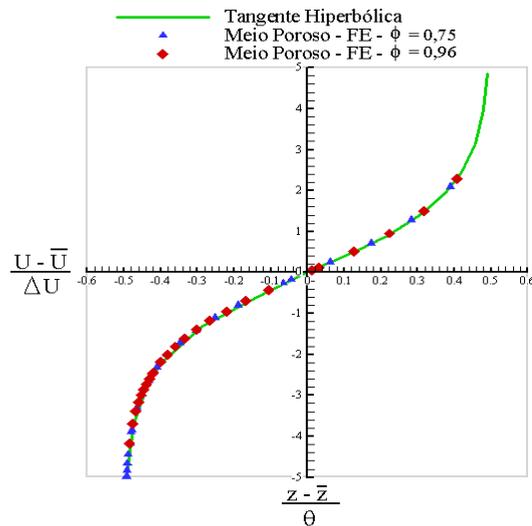


Figura 5.43: Floresta Esparsa: Colapso do perfil da velocidade média para metodologia de meios porosos. Comparação entre os perfis da velocidade e o perfil de uma tangente hiperbólica.