

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**JAMILY FAÉ STOCCO**

**INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO TURBULENTO  
MODIFICADO POR BARREIRAS POROSAS ARTIFICIAIS E NATURAIS  
APLICADAS NO CONTROLE DA EROSÃO EÓLICA DE MATERIAIS  
GRANULADOS**

VITÓRIA

2021

**JAMILY FAÉ STOCCO**

**INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO TURBULENTO  
MODIFICADO POR BARREIRAS POROSAS ARTIFICIAIS E NATURAIS  
APLICADAS NO CONTROLE DA EROSÃO EÓLICA DE MATERIAIS  
GRANULADOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Poluição do Ar

Orientadores: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Jane Meri Santos

Prof. Dr. Bruno Furieri

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas -  
SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Stocco, Jamily Faé, 1989-

S864i      Investigação do escoamento atmosférico turbulento  
modificado por barreiras porosas artificiais e naturais aplicadas  
no controle da erosão eólica de materiais granulados / Jamily Faé  
Stocco. - 2021.      199 f. : il.

Orientadora: Jane Meri Santos.

Coorientador: Bruno Furieri.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)

Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Dinâmica dos fluidos computacional. I. Santos, Jane Meri.  
II. Furieri, Bruno. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

# INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO TURBULENTO MODIFICADO POR BARREIRAS POROSAS ARTIFICIAIS E NATURAIS APLICADAS NO CONTROLE DA EROÇÃO EÓLICA DE MATERIAIS GRANULADOS

**Jamily Faé Stocco**

**Banca Examinadora:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Jane Meri Santos  
Orientadora - PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. Bruno Furieri  
Orientador – PPGEA/CT/UFES

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elisa Valentim Goulart  
Examinadora Interna – PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza  
Examinador Externo – UFRGS

Prof. Dr. Rafael Sartim  
Examinador Externo – ArcelorMittal Tubarão/UFES

ELISA VALENTIM GOULART  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 17 de agosto de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA

O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
BRUNO FURIERI - SIAPE 1238759  
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT  
Em 06/10/2021 às 15:09

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/282066?tipoArquivo=O>

Este trabalho é dedicado ao Senhor Jesus Cristo, o Autor da minha vida. Porque d'Ele por Ele e para Ele são todas as coisas.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que Ele é, tem feito em minha vida, por estar comigo, fortalecendo-me em todos os momentos e jamais me deixar desistir.

A minha família em especial aos meus pais pelo apoio, paciência e carinho em todos os momentos da minha jornada. Sem o apoio e suporte de vocês de diversas maneiras este projeto seria muito difícil de ser finalizado. Minha gratidão por tudo que sempre fizeram por mim.

Aos meus orientadores a Prof<sup>a</sup>. Jane Meri Santos e Prof. Bruno Furieri pelo ensino e experiência compartilhado, pela também por toda paciência ao longo do tempo de construção de desenvolvimento do projeto. Agradeço especialmente a oportunidade de crescimento e desenvolvimento ofereceram. Agradeço em especial ao Prof. Bruno Furieri que decidiu acreditar no meu trabalho e me proporcionou tanto desenvolvimento e oportunidades, serei profundamente grata sempre.

Aos meus amigos do NQualiar pelo grande apoio e amizade ao longo desta jornada, digo que vocês foram fundamentais para conclusão dessa etapa.

A todos que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento e conclusão dessa etapa em minha vida. A todos o meu muito obrigada!

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajosa!  
Não tenha medo e nem desanime, pois Eu  
o Senhor, o seu Deus, estou com você por  
onde você andar”.

(Bíblia Sagrada, Josué 1:9)

## RESUMO

A emissão de material particulado e seu transporte na atmosfera resultam no aumento das concentrações de partículas na atmosfera, causando degradação da qualidade do ar e potencial geração de riscos para a saúde humana. A implantação de barreiras de vento ao redor de pátios industriais de estocagem de materiais granulados é um importante método de controle destas emissões fugitivas reduzindo a velocidade do vento que chega à superfície de terrenos e pilhas. Tal importância no controle da erosão motivou o presente trabalho que tem como objetivo estudar o escoamento atmosférico turbulento na presença de barreiras naturais e artificiais, a fim de analisar sua influência na redução da velocidade do escoamento e na formação da região de abrigo devido à sua ação. Foram realizadas simulações numéricas do escoamento atmosférico através de barreiras de vento utilizando diferentes métodos de implementação na modelagem matemática, além de diferentes modelos de turbulência RANS. Os resultados foram comparados a dados de experimentos em túnel de vento encontrados na literatura para validação das simulações numéricas. Foi investigada a sensibilidade do campo de velocidade em relação aos parâmetros morfológicos das barreiras vegetais e à porosidade das barreiras artificiais. Os modelos apresentaram melhor predição do escoamento na região interior da barreira, e tiveram menor precisão na predição dos resultados de esteira próxima para todos os cenários (subestimativa do coeficiente adimensional de redução da velocidade). O comportamento dos modelos de turbulência RANS foi bastante similar com diferenças da ordem de 12% para média e alta densidades e 34% para baixa densidade de árvores na barreira. O emprego do perfil vertical do coeficiente de resistência inercial para a barreira natural melhorou a predição do escoamento dentro da barreira de árvores, influenciou a formação da região de abrigo e a velocidade de fricção na região a jusante. Adicionalmente, o parâmetro porosidade da barreira artificial teve papel importante no comportamento da velocidade de fricção para estes casos. O aumento da porosidade levou à redução mais branda da velocidade de fricção na região de proteção a jusante da barreira, que foi 32% menor quando a porosidade aumentou para 60%, porém aumentou o alcance da área de proteção na esteira. Com o presente trabalho foi possível compreender de forma detalhada o escoamento modificado por barreiras porosas para atenuação da velocidade do vento e identificar melhores práticas de modelagem matemática destas estruturas com vistas a aplicação em estudos completos envolvendo a erosão de pilhas de estocagem de materiais granulados e vias de tráfego em pátios industriais.

## ABSTRACT

The emission of particulate matter and its transport into the atmosphere result in increased concentrations of particles in the atmosphere, causing degradation of air quality and potential generation of risks to human health. The presence of wind barriers around industrial yards of granular materials storage piles is an important method of controlling these fugitive emissions by reducing the near surface wind velocity. Such importance in erosion control motivated the present work, which aims to study turbulent atmospheric flow in the presence of natural and artificial barriers, in order to analyze its influence in reducing the flow velocity and the shelter region due to its presence. Numerical simulations of atmospheric flow through wind barriers were performed using different mathematical modeling setup, in addition to different RANS turbulence models. The results were compared to data from wind tunnel experiments found in the literature to validate the numerical simulations. The sensitivity of the velocity field in relation to the morphological parameters of plant barriers and the porosity of artificial barriers was investigated. The models showed better flow prediction in the inner region of the barrier, and had less precision in predicting the wake results for all scenarios (underestimation of the dimensionless coefficient of velocity reduction). The behavior of the RANS turbulence models was very similar with differences of around 12% for medium and high densities and 34% for low density of trees in the barrier. The use of the vertical profile of the inertial resistance coefficient for the natural barrier improved the flow prediction within the tree barrier, influenced the formation of the shelter region and the friction velocity in the downstream region. Additionally, the porosity parameter of the artificial barrier played an important role in reducing the friction speed for these cases. The increase in porosity led to a milder reduction in the friction velocity in the protection region downstream of the barrier, which was 32% lower when the porosity increased to 60%, but increased the protection area due to the barrier. With the present work it was possible to understand in detail the flow modified by porous barriers to attenuate the wind velocity and to identify best practices of mathematical modeling of porous barriers with a view to application in complete studies involving the erosion of granular materials storage piles and roads in industrial yards.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema dos regimes e características do escoamento ao redor de um quebra-vento poroso bidimensional e perpendicular à direção do vento. Adaptado de Lyu; Wang; Mason (2020)..... 37
- Figura 2: Escoamento do vento a jusante de uma barreira de vento porosa, três regimes distintos de fluxo. Adaptado de Bean, Alferi e Federer (1975)..... 39
- Figura 3: Descrição da redução da velocidade do escoamento na barreira vegetal ao longo da distância para diferentes porosidade. Adaptado de Wang; Takle; Shen (2001) ..... 40
- Figura 4: Escoamento médio em torno de: (a) barreira sólida ( $\beta = 0\%$ ), (b) barreira porosa de porosidade muito baixa ( $\beta < \beta_0$ ), (c) barreira porosa de baixa porosidade ( $\beta_0 < \beta < \beta_c$ ) e (d) barreira de alta porosidade ( $\beta > \beta_c$ ). Adaptado de Bruno, Horvat e Raffaele (2018) 42
- Figura 5: Perfis verticais das componentes (a) horizontal e (b) vertical de velocidades. Adaptado de Dong et al., (2010) ..... 45
- Figura 6: (a) Representação esquemática de barreiras sólida e porosa artificial e (b) resultado da distribuição da velocidade de fricção obtidas para escoamento modificado para uma (b-I) barreira sólida com  $\beta=0\%$  e (b-II) uma barreira porosa com 36% de porosidade, onde a linha azul é a distribuição da velocidade de fricção adimensional do escoamento médio e a linha vermelha tracejada é a velocidade de fricção adimensional do escoamento instantâneo. Adaptado de Basnet e Constantinescu (2017)..... 46
- Figura 7: Esquema representativo da Fábrica POSCO Kwang-Yang, vista superior de sua localização e arranjo do site industrial. Adaptado de Park e Lee (2002) ..... 66
- Figura 8: Esquema representativo do pátio de estocagem de carvão do Porto de Qinhuangdao, vista superior do arranjo das pilhas com o posicionamento da barreira de vento e localização dos pontos de medição das campanhas de campo. Adaptado de Cong et al. (2013)..... 69

- Figura 9: Estudo em túnel de vento com a utilização de plantas naturais, tubo de Pitot posicionados ao longo da linha central e diferentes densidades de cobertura vegetal (Adaptado de Miri, Dragovich e Dong, 2017)..... 75
- Figura 10: Espécie *C. bipinnapus* (a) e *L. lucidum* (b) utilizadas Miri, Dragovich e Dong (2017) em experimento de túnel de vento e gráfico do perfil vertical de LAD usado na simulação numérica do presente estudo. Adaptado de Miri, Dragovich e Dong (2017).75
- Figura 11: (a) Representação esquemática da seção de teste do túnel de vento nos experimentos conduzidos por Miri, Dragovich e Dong (2017) com barreira vegetal; (b) distribuição das plantas de acordo com seu arranjo; (c) vista em perspectiva da vegetação representada e; (d) distribuição pontos de obtenção dos dados de acordo com o experimento em túnel de vento..... 76
- Figura 12: Vista superior da barreira vegetal de acordo com a distribuição das plantas, espaçamento e arranjo das densidades baixa (a), média (b) e alta(c), respectivamente. 77
- Figura 13: Comparação dos perfil verticais de distribuição do LAD descrito pela equação de Lalic e Mihailovic (2004) para a estratificação de  $N$  em  $H_{m\acute{a}x}$  (quadrado laranja) e considerando um valor fixo de  $N$  (círculo preto). Nos gráficos (a), (b) e (c) o quadrado laranja, o perfil de LAD é descrito considerando a extratificação de  $N$ , onde para  $z < H_{m\acute{a}x}$   $N=2$  e para  $z > H_{m\acute{a}x}$ ,  $N=0,5$ . No círculo preto, o perfil é descrito com  $N=2$  para  $0 > z > H$  ..... 81
- Figura 14: Representação esquemática dos experimentos conduzidos por Dong et al., 2010 com barreira artificial (Adaptado de Dong et al., 2010)..... 85
- Figura 15: Valores correspondente aos parâmetros de Yeh, Tsai e Yang (2010) (Adaptado de Yeh, Tsai e Yang, 2010)..... 87
- Figura 16: Fluxograma de descrição dos casos, modelagem da turbulência, e equações utilizados no presente estudo em barreiras de vento artificiais. .... 88
- Figura 17: Síntese das etapas e parâmetros apresentados na metodologia que serão avaliados no presente estudo. .... 89

|   |     |
|---|-----|
| Figura 18: Esquema representativo do domínio computacional simulado da barreira artificial.....   | 105 |
| Figura 19: Comparação dos perfis de entrada de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura entre o experimental de Dong et. al (2010) e as simulações numéricas. (a) Velocidade e (b) Intensidade de turbulência obtidos pelo modelo de turbulência modelo $\kappa$ - $\epsilon$ Realizável; (c) Velocidade e (d) Intensidade da turbulência calculados com o modelo de turbulência o modelo $\kappa$ - $\omega$ SST..... | 106 |
| Figura 20: Fluxograma dos processos de discretização das equações de transporte em um domínio computacional. Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish, 2016. ....   | 108 |
| Figura 21: Representação de discretização do volume de controle no domínio computacional em 1D. Adaptado de Moukalled; Mangani e Darwish, 2016.....   | 109 |
| Figura 22: Esquema de transporte de uma variável ao longo do volume de controle. Adaptado de Moukalled; Mangani e Darwish, 2016.....  | 110 |
| Figura 23: Fluxograma de descrição dos casos, modelagem da turbulência utilizados no presente estudo em barreiras de vento naturais. ....   | 115 |
| Figura 24: Linhas para obtenção dos perfis do coeficiente adimensional de redução da velocidade ao longo da horizontal nas posições de (I) $z/H=0,8$ e (II) $z/H=1$ e na vertical nas posições de (III) $x/H=6,6$ e (IV) $x/H=12$ . ....  | 116 |
| Figura 25: (a) Perfis horizontais nas posições verticais $z/H = 0,8$ e $z/H = 1$ e (b) perfis verticais nas posições longitudinais $x/H = 6,6$ e $x/H = 12$ obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et al. (2017) para baixa densidade de barreira. ....  | 117 |
| Figura 26: (a) Perfis horizontais nas posições verticais $z/H = 0,8$ e $z/H = 1$ e (b) perfis verticais nas posições longitudinais $x/H = 6,6$ e $x/H = 12$ , obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et. al (2017) para média densidade de barreira. ....  | 119 |
| Figura 27: (a) Perfis horizontais nas posições verticais $z/H = 0,8$ e (b) $z/H = 1$ e (b) perfis verticais nas posições longitudinais $x/H = 6,6$ e $x/H = 12$ obtidos na simulação numérica   |     |

- usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et. al (2017) para alta densidade de barreira. .... 120
- Figura 28: Perfis horizontais de energia cinética turbulenta nas posições verticais  $z/H = 0,8$  obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência para: (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira. .... 123
- Figura 29: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG com valores de  $LAD_{m\acute{a}x}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira. .... 124
- Figura 30: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável com valores de  $LAD_{m\acute{a}x}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira. .... 125
- Figura 31: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST com valores de  $LAD_{m\acute{a}x}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira. .... 126
- Figura 32: Comparação dos perfis vertical e horizontal do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes modelos de turbulência ( $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG;  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST) medido em diferentes densidades. .... 129
- Figura 33: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) para baixa densidade de barreira. .... 131
- Figura 34: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) para média densidade de barreira. .... 132

- Figura 35: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) para alta densidade de barreira. .... 133
- Figura 36: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) em baixa densidade de área plantada..... 134
- Figura 37: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) em média densidade de área plantada..... 135
- Figura 38: Perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade com  $LAD_{máx}$  de  $1\text{m}^2/\text{m}^3$  para diferentes percentagem de altura de  $H_{máx}$  (85%, 90% e 95%) para  $N=4$  nas densidades (a) e (d) baixa, (b) e (e) média e (c) e (f) alta.. 138
- Figura 39: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade com  $LAD_{máx}$  de  $1\text{m}^2/\text{m}^3$  para diferentes percentagem de altura de  $H_{máx}$  (85%, 90% e 95%) para  $N=2$  nas densidades (a) e (d) baixa, (b) e (e) média e (c) e (f) alta. .... 140
- Figura 40: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b) baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD=0,5\text{m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical uniforme ( $N=0$ )..... 143
- Figura 41: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b) baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD_{máx}=0,5\text{m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical exponencial com  $N=2$ ..... 145
- Figura 42: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b)

baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD_{m\acute{a}x}=0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical exponencial com  $N=4$ ..... 146

Figura 43: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $N=0$  para baixa e alta densidade, respectivamente. .... 148

Figura 44: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $N=2$  e  $H_{m\acute{a}x}= 85\%$  para baixa e alta densidade, respectivamente. .... 149

Figura 45: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $N=4$  e  $H_{m\acute{a}x}= 85\%$  para baixa e alta densidade, respectivamente. .... 150

Figura 46: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando as equações propostas Song et al. (2014), Xu Calay e Mustafa (2019) e Yeh; Tsai; Yang (2010) para o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 20% de porosidade..... 156

Figura 47: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando as equações propostas Song et al. (2014), Xu Calay e Mustafa (2019) e Yeh; Tsai; Yang (2010) para o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 40% de porosidade..... 159

Figura 48: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 80% de porosidade..... 162

Figura 49: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 20% de porosidade no plano xz em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST (b) comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c)..... 165

- Figura 50: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 40% de porosidade no plano xz em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c). ..... 167
- Figura 51: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 80% de porosidade no plano xz em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c). ..... 168
- Figura 52: Resultado da vorticidade calculada em y no plano xz em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 20% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c) ..... 169
- Figura 53: Resultado da vorticidade calculada em y no plano xz em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 40% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c) ..... 170
- Figura 54: Resultado da vorticidade calculada em y no plano xz em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 80% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c). ..... 170
- Figura 55: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 20% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019). ..... 173
- Figura 56: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha

e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 40% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019)..... 174

Figura 57: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 60% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019)..... 176

Figura 58: Detalhe da barreira vegetal no domínio computacional. Vista frontal da vegetação e destaque dos elementos prismáticos da região próximo a superfície sólida. .... 192

Figura 59: Perfis de velocidade e energia cinética turbulenta calculados a partir de diferentes malhas. (a) e (b) são apresentados os resultados simulados usando o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG, (c) e (d) o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST ..... 194

Figura 60: Detalhe da barreira porosa artificial no domínio computacional. Vista perpendicular da barreira e destaque dos elementos prismáticos da região próximo a superfície sólida..... 196

Figura 61: Comparação dos perfis de entrada de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura entre o experimental de Dong et. al (2010) e as simulações numéricas. (a) Velocidade e (b) Intensidade de turbulência obtidos pelo modelo de turbulência modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável; (c) Velocidade e (d) Intensidade da turbulência calculados com o modelo de turbulência o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST..... 197

Figura 62: Comparação dos perfis verticais da componente longitudinal de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável. 198

Figura 63: Comparação dos perfis verticais da componente vertical de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável. ... 198

Figura 64: Comparação dos perfis de energia cinética turbulenta para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável..... 198

Figura 65: Comparação dos perfis verticais da componente longitudinal para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de modelagem da turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST ..... 198

Figura 66: Comparação dos perfis verticais da componente vertical de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST ..... 199

Figura 67: Comparação dos perfis de energia cinética turbulenta para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de modelagem da turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST. .... 199

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1: Revisão da literatura e identificação dos principais aspectos avaliados nos estudos de barreira de vento (artificial e natural) ..... | 36 |
| Quadro 2: Estudos que avaliaram os efeitos da implantação de barreiras de vento artificiais no escoamento em pilhas e pátios de estocagem.....  | 63 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1: Descrição dos parâmetros morfológicos usados na implementação da vegetação nos casos simulados.....                                     | 81  |
| Tabela 2: Valor corresponde aos parâmetros da equação de Yeh, Tsai e Yang (2010)  | 86  |
| Tabela 3: Condições de contorno para o cenário com barreira vegetal.....  | 102 |
| Tabela 4: Condições de contorno da simulação numérica do escoamento na barreira artificial.....   | 107 |
| Tabela 5: Comparação do valor do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados por diferentes relação empíricas encontradas na literatura ..... | 152 |
| Tabela 6: Descrição das malhas computacionais avaliadas no teste de sensibilidade.  | 193 |
| Tabela 7: Descrição das malhas computacionais avaliadas no teste de sensibilidade da barreira porosa artificial.....                              | 196 |

## LISTA DE SIGLAS

|                   |  |
|-------------------|--|
| 2D                | Bidimensional  |
| CFD               | <i>Computation Fluid Dynamics</i>                                    |
| DNS               | <i>Direct Numerical Simulation</i>                                   |
| LES               | <i>Large Eddy Simulation</i>   |
| LAD               | <i>Leaf Area Density</i>   |
| MVF               | Método dos Volumes Finitos   |
| PIV               | <i>Particle Image Velocity</i>                                       |
| PTV               | <i>Particle Tracking Velocity</i>                                    |
| PM                | <i>Particulate Material</i>  |
| PM <sub>10</sub>  | <i>Particulate Material com granulometria de 10 μm</i>               |
| PM <sub>2.5</sub> | <i>Particulate Material com granulometria de 10 μm</i>               |
| RMGV              | Região Metropolitana da Grande Vitória                               |
| RNG               | <i>Renormalization Group Theory</i>                                  |
| RANS              | <i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>                               |
| RSM               | <i>Reynolds Stress Equation Model</i>                                |
| SIMPLE            | <i>Semi-Implicit Method For Pressure-Linked Equations</i>            |
| SIMPLEC           | <i>Semi-Implicit Method For Pressure-Linked Equations Consistent</i> |
| SST               | <i>Shear Stress Transport</i>  |
| 3D                | Tridimensional   |
| TKE               | <i>Turbulent Kinect Energy</i>                                       |
| RMS               | <i>Root Mean Square</i>  |

## LISTA DE VARIÁVEIS

|  |   |   |
|--|---|---|
| $N$  | Abertura da região de folhas da vegetação   | [-]   |
| $H$  | Altura da barreira  | [m]   |
| $h_p$  | Altura da pilha (San2019)   | [m]   |
| $z_m$  | Altura de LAD máximo  | [m]   |
| $H_{m\acute{a}x}$  | Altura em $z$ com valor de LAD máximo   | [%]   |
| $A_o$  | Área dos poros na barreira artificial   | [m <sup>2</sup> ]                                   |
| $A_{FP}$   | Área frontal projetada  | [m <sup>2</sup> ]                                   |
| $A_T$  | Área total da barreira porosa   | [m <sup>2</sup> ]                                   |
| $\beta_0$  | Baixa porosidade ( $0 < \beta < 0,1$ )  | [%]   |
| $c_p$  | Calor específico a pressão constante  | [m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> .T <sup>-1</sup> ] |
| $C_D$  | Coefficiente de arrasto   | [-]   |
| $\lambda$  | Coefficiente de fricção   | [-]   |
| $k_r$  | Coefficiente de perda de pressão  | {kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> }              |
| $C_p$  | Coefficiente de pressão   | [-]   |
| $C_p$  | Coefficiente de pressão   | []  |
| $C_i$  | Coefficiente de resistência inercial  | [m <sup>-1</sup> ]                                  |
| $C_{WT}$   | Coefficiente de resistência inercial na escala de túnel de vento                                      | [m <sup>-1</sup> ]                                  |
| $C_{WT}$   | Coefficiente de resistência inercial na escala de túnel de vento                                      | [m <sup>-1</sup> ]                                  |
| $C_{iFS}$  | Coefficiente de resistência inercial na escala real   | [m <sup>-1</sup> ]                                  |
| $C_{iFS}$  | Coefficiente de resistência inercial na escala real   | [m <sup>-1</sup> ]                                  |
| $u_i$  | Componente da velocidade na direção $i$   | [m.s <sup>-1</sup> ]                                |
| $l$  | Comprimento característico  | [m]   |
| $k_c$  | Condutividade térmica do fluido   | [kg.m.s <sup>-3</sup> .T <sup>-1</sup> ]            |
| $\zeta_0, \zeta, \zeta_\phi,$<br>$\varepsilon_{0Re}$     | Constante   | [-]   |
| $c$  | Constante da equação do coeficiente de resistência inercial calculado em função do número de Reynolds | [-]   |
| $C_\mu$  | Constante empírica do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$                                  | [-]   |
| $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$   | Constantes do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$  | [-]   |
| $A_0, A_s$   | Constantes do modelo de turbulência $\kappa$ - $\varepsilon$  | [-]   |
| $\beta_p, \beta_d, C_{\varepsilon 4}, C_{\varepsilon 5}$ | Constantes do termo fonte de turbulência  | [-]   |
| $\zeta_{kB}$   | Correção do cálculo do coeficiente de perda de pressão  | [-]   |

|   |  |  |
|---|--|--|
| $\delta_{ij}$                                   | Delta de Kronecker   | [-]                                    |
| $\rho$  | Densidade do fluido  | [kg.m <sup>-3</sup> ]                  |
| $d_r$   | Diâmetro hidráulico  | [m]                                    |
| $\Delta P_{WT}$                                 | Diferença de pressão na escala de túnel de vento                             | [Pa]                                   |
| $\Delta P_{FS}$                                 | Diferença de pressão na escala real  | [Pa]                                   |
| $\kappa$  | Energia cinética turbulenta  | [m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]     |
| $B$   | Espessura da barreira  | [m]                                    |
| $B_{WT}$  | Espessura da barreira de vento na escala de túnel de vento                   | [m]                                    |
| $B_{WT}$  | Espessura da barreira de vento na escala de túnel de vento                   | [m]                                    |
| $B_{FS}$  | Espessura da barreira de vento na escala real                                | [m]                                    |
| $B_{FS}$  | Espessura da barreira de vento na escala real                                | [m]                                    |
| $u'_i$  | Flutuação da velocidade na direção $i$                                       | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $F_D$   | Força de arrasto   | [kg.m.s <sup>-2</sup> ]                |
| $F_1, F_2,$                                     | Funções de mistura no modelo $\kappa$ - $\omega$ SST                         | [-]                                    |
| $G_\omega$                                      | Geração de $\omega$  | [-]                                    |
| $x_{\min}$                                      | Localização da velocidade mínima na esteira barreiraa determinada altura $z$ | [m]                                    |
| $U$   | Magnitude da velocidade média  | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $\bar{u}_i$                                     | Média da componente da velocidade na direção $i$                             | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $Re$  | Número de Reynolds   | [-]                                    |
| $\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon, \sigma_\omega$ | Números de Prandtl dos modelos de turbulência                                | [-]                                    |
| $\alpha$  | Permeabilidade   | [m <sup>2</sup> ]                      |
| $\beta$   | Porosidade   | %                                      |
| $\beta_c$                                       | Porosidade crítica   | [%]                                    |
| $G_b$   | Produção de energia cinética turbulenta pelos gradientes de flutuabilidade   | [N.m <sup>-2</sup> .s]                 |
| $G_k$   | Produção de energia cinética turbulenta pelos gradientes de velocidade       | [N.m <sup>-2</sup> .s]                 |
| $\Delta p$                                      | Queda de pressão   | [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> ] |
| $R_u$   | Recirculação frontal (vórtice shedding)                                      | [-]                                    |
| $R_d$   | Recirculação na esteira  | [-]                                    |
| $z_0$   | Rugosidade superficial   | [m]                                    |
| $\epsilon$                                      | Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta                            | [m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> ]     |
| $\omega$  | Taxa de dissipação específica  | [s <sup>-1</sup> ]                     |
| $\theta$  | Temperatura potencial  | [K]                                    |

|                 |  |  |
|-----------------|--|--|
| $t$             | Tempo  | [s]                                    |
| $\tau_{ij}$     | Tensor de Reynolds   | [N.m <sup>-2</sup> ]                   |
| $\Omega_{ij}$   | Tensor taxa de rotação   | [s <sup>-1</sup> ]                     |
| $S_\varepsilon$ | Termo fonte de dissipação de energia cinética turbulenta         | [N.m <sup>-3</sup> ]                   |
| $S_\kappa$      | Termo fonte de energia cinética turbulenta                       | [N.m <sup>-3</sup> ]                   |
| $S_{ui}$        | Termo fonte de quantidade de movimento                           | [N/m <sup>-3</sup> ]                   |
| $\Delta p$      | Variação de pressão  | [Pa]                                   |
| $\omega_k$      | Velocidade angular   | [s <sup>-1</sup> ]                     |
| $u_*$           | Velocidade de fricção  | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $u_{*ref}$      | Velocidade de fricção de referência                              | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $U_\infty$      | Velocidade do vento na corrente livre                            | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $U_h$           | Velocidade média (San2019)                                       |  |
| $u$             | Velocidade média do escoamento modificada pela barreira de vento | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $u_0$           | Velocidade média não perturbada pela barreira de vento           | [m.s <sup>-1</sup> ]                   |
| $\nu$           | Viscosidade cinemática   | [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]     |
| $\nu_t$         | Viscosidade cinemática turbulenta                                | [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]     |
| $\mu$           | Viscosidade dinâmica do fluido                                   | [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ] |

## SUMÁRIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | INTRODUÇÃO .....   | 29 |
| 2       | OBJETIVOS.....   | 35 |
| 2.1     | Objetivo geral .....   | 35 |
| 2.2     | Objetivos específicos .....  | 35 |
| 3       | REVISÃO DA LITERATURA.....   | 36 |
| 3.1     | CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UMA BARREIRA DE VENTO E SEUS PARÂMETROS RELEVANTES .....  | 37 |
| 3.2     | TÉCNICAS DE MODELAGEM DO ESCOAMENTO AO REDOR DE BARREIRAS DE VENTO.....  | 48 |
| 3.3     | ESTUDOS DE APLICAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE BARREIRA DE VENTO NA ATENUAÇÃO DA VELOCIDADE INCIDENTE EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM DE MATERIAIS GRANULADOS ..... | 62 |
| 4       | METODOLOGIA .....  | 73 |
| 4.1     | CENÁRIOS INVESTIGADOS: BARREIRA DE VENTO VEGETAL E ARTIFICIAL.....   | 73 |
| 4.1.1   | Escoamento em barreiras naturais .....   | 74 |
| 4.1.1.1 | Detalhes do experimento conduzido por Miri, Dragovich e Dong (2017)  | 74 |
| 4.1.1.2 | Representação física e matemática da barreira natural .....  | 77 |
| 4.1.2   | Escoamento em barreira porosa artificial .....   | 84 |
| 4.1.2.1 | Detalhes do experimento conduzido por Dong et al. (2007, 2010)...  | 84 |
| 4.1.2.2 | Representação física e matemática da barreira porosa artificial .....  | 85 |
| 4.2     | MODELAGEM MATEMÁTICA .....   | 89 |
| 4.2.1   | Equações governantes e a modelagem da turbulência .....  | 89 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.2.2   | Inclusão dos efeitos das barreiras vegetal e artificial porosa nas equações de transporte e nos modelos de turbulência.....                  | 99  |
| 4.2.3   | Condições de contorno e domínio computacional.....   | 102 |
| 4.2.3.1 | Cenário com barreira natural.....  | 102 |
| 4.2.3.2 | Análise da similaridade .....  | 103 |
| 4.2.3.3 | Cenário com barreira artificial porosa.....  | 105 |
| 4.3     | MÉTODO NUMÉRICO .....  | 107 |
| 4.3.1   | Discretização das equações de transporte.....  | 107 |
| 4.3.2   | Solução do sistema algébrico de equações .....   | 112 |
| 4.3.3   | Esquema de interpolação das variáveis no volume de controle .....  | 113 |
| 4.3.4   | Acoplamento pressão-velocidade .....   | 113 |
| 5       | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....  | 114 |
| 5.1     | ESCOAMENTO EM BARREIRAS DE VENTO NATURAIS.....   | 114 |
| 5.1.1   | Análise comparativa dos modelos de turbulência .....   | 114 |
| 5.1.2   | Análise da influência da densidade de área foliar (LAD) no coeficiente de resistência inercial .....   | 123 |
| 5.1.3   | Análise da influência da variação da densidade de área plantada (densidade da barreira vegetal) no coeficiente de resistência inercial ..... | 128 |
| 5.1.4   | Análise da influência da variação do perfil vertical (N) do coeficiente de resistência inercial no escoamento .....                          | 130 |
| 5.1.5   | Análise da influência da altura de LAD máxima ( $H_{máx}$ ) no coeficiente de resistência inercial .....                                     | 136 |
| 5.1.6   | Análise da influência da variação vertical de LAD (valor de N) na velocidade de fricção à jusante da barreira vegetal .....                  | 141 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.1.7 | Análise da influência da variação vertical de LAD (valor de N) no campo de velocidade à jusante da barreira vegetal .....           | 146 |
| 5.2   | ESCOAMENTO EM BARREIRAS DE VENTO ARTIFICIAIS .....  | 152 |
| 5.2.1 | Análise da performance dos modelos de turbulência investigados relativamente à predição do coeficiente de resistência inercial..... | 152 |
| 5.2.2 | Efeito da porosidade na velocidade superficial em terrenos planos a jusante de uma barreira artificial.....                         | 170 |
| 6     | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....   | 178 |
| 6.1   | CONCLUSÕES .....  | 178 |
| 6.2   | PERSPECTIVAS .....  | 183 |
|       | REFERÊNCIAS .....   | 185 |
|       | APÊNDICE I – Teste de sensibilidade da malha .....  | 191 |

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão eólica de pilhas de estocagem de materiais granulados em unidades industriais resulta no entranhamento de partículas para a atmosfera, resultando no aumento da concentração de particulados na atmosfera, na degradação da qualidade do ar e na geração de riscos para a saúde humana. Por exemplo, as indústrias minero-siderúrgicas localizadas na Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), no estado do Espírito Santo, segundo dados do inventário de fontes realizado pelo órgão ambiental no ano base de 2015, são responsáveis por 68,0% da taxa de emissão de material particulado total, 70,4% de  $PM_{10}$  (material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a  $10\mu m$ ) e 71,6% de  $PM_{2,5}$  (material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a  $2,5\mu m$ ), sendo que dessas a taxa de emissão proveniente de pilhas em pátios de estocagem correspondente à 33,2 kg/h que equivale à 4% de material particulado total, 16,4 kg/h equivalente 3% de  $PM_{10}$  e 3,28 kg/h correspondente 1% de  $PM_{2,5}$  (IEMA, 2019).

Uma estratégia para controle da erosão eólica em pilhas é a implantação de barreiras de vento ao redor de pátios de estocagem em unidades industriais. As barreiras de vento causam resistência ao escoamento do vento, funcionando como sumidouros de quantidade de movimento que modificam o escoamento atmosférico e formam regiões com diferentes características de escoamento ao seu redor (LYU; WANG; MASON, 2020; SPECKART; PARDYJAK, 2014), proporcionando assim o efeito de abrigo nas suas proximidades (SANTIAGO et al., 2007; FERREIRA; LAMBERT, 2011; SAN; WANG; QIU, 2018). As barreiras podem ser naturais como cinturões de árvores ou artificiais como telas porosas de materiais construtivos diversos.

Os efeitos causados por essas barreiras no escoamento e sua capacidade de proteção podem ser avaliados usando diferentes abordagens. Comumente, são utilizadas: técnicas de medição de campo, modelagem física em escala reduzida em túnel de vento, bem como modelagem matemática e computacional (BADR; HARION, 2005; HONG; LEE; SEO, 2015; LIU et al., 2014; LIU et al., 2018; LYU; WANG; MASON, 2020).

Nas medições diretas em campo, a impossibilidade de controle de certas variáveis e o custo elevado são limitantes para sua utilização. Experimentos laboratoriais em túnel de

vento tem sido frequentemente usados ao longo dos anos na investigação dos efeitos causados por diferentes tipos de barreiras no escoamento (BORGES; VIEGAS, 1988; DONG et al., 2007, 2010; MUSTAFA et al., 2016; XU; CALAY; MUSTAFA, 2019). Estudos laboratoriais em túnel de vento fornecem maior capacidade de controle e repetibilidade dos experimentos. Contudo, assim como nas medições diretas em campo, os dados só podem ser obtidos em um número limitado de pontos no espaço. Além disso, a modelagem física necessita obedecer a requisitos de similaridade, que muitas vezes são difíceis de serem alcançados nesse método de estudo (TOMINAGA; STATHOPOULOS, 2016).

Por outro lado, a modelagem numérica com o uso de ferramentas da Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics*, CFD) tem como principal vantagem a estimativa das variáveis de interesse com refinada resolução espacial e temporal em todo o domínio computacional. Sendo assim, o escoamento e suas estruturas (vórtices e regiões características) podem ser avaliados com melhor resolução espacial em relação a experimentos de campo e em túnel de vento (BADR; HARION, 2005; LIU et al., 2014; LIU, C. et al., 2018; ROSENFELD; MAROM; BITAN, 2010; SAN; ZHAO; QIU, 2019; XU; CALAY; MUSTAFA, 2019; ZENG et al., 2020).

A correta predição do escoamento depende dos modelos utilizados para representação dos fenômenos físicos. Assim, a escolha do modelo de turbulência, por exemplo, é relevante para a avaliação das modificações do escoamento originadas pela barreira de vento e dos efeitos na emissão das partículas por erosão eólica (DUPONT; BERGAMETTI; SIMOËNS, 2014; HONG; LEE; SEO, 2015; ROSENFELD; MAROM; BITAN, 2010; SAN; WANG; QIU, 2018; SAN; ZHAO; QIU, 2019). É importante notar, porém, que o tempo de resposta e o custo computacional das simulações são destacados como fatores decisórios na escolha do modelo de turbulência a ser utilizado.

Os modelos de turbulência mais frequentemente empregados são aqueles baseados nas Médias de Reynolds aplicadas às Equações de Navier-Stokes (*Reynolds Averaged Navier Stokes*, RANS) e Simulação das Grandes Escalas (*Large Eddy Simulations*, LES), visto que a Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation*, DNS) ainda apresenta um elevado custo computacional para as aplicações pretendidas no presente trabalho (BASNET; CONSTANTINESCU, 2019; SAN; ZHAO; QIU, 2019). Os modelos RANS

apresentam menor custo computacional em relação aos métodos LES e DNS e, portanto, são mais frequentemente encontrados na literatura para predição dos campos de velocidade e turbulência formados na vizinhança da barreira de vento, bem como para avaliação da redução da velocidade e na formação da região de proteção à erosão eólica (DESMOND; WATSON; HANCOCK, 2017; HONG; LEE; SEO, 2015; LIU et al., 2014; LIU et al., 2018; ROSENFELD; MAROM; BITAN, 2010; SAN; WANG; QIU, 2018; SONG et al., 2014; XU; CALAY; MUSTAFA, 2019; ZENG et al., 2020).

Liu et. al. (2014) avaliaram, dentre outros objetivos, a capacidade da ferramenta CFD na previsão do escoamento ao redor de um modelo de barreira de vento utilizando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST. Os resultados apresentaram boa concordância com os dados experimentais obtidos em túnel de vento, incluindo perfis de velocidade e regiões de escoamento modificadas pela barreira comprovando a capacidade e confiabilidade da técnica CFD na modelagem de barreiras porosas.

Hong, Lee e Seo (2015) utilizaram diferentes modelos de turbulência ( $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\epsilon$  de baixo Reynolds) para avaliar em modelagem numérica os efeitos da barreira porosa na redução da velocidade do vento, utilizando experimento em túnel de vento para validação e comparação dos resultados. Os resultados mostraram que o modelo RNG apresentou erro inferior a 6% para os casos testados e foi o melhor resultado entre os modelos avaliados. Santiago et al. (2007) avaliaram o desempenho de diferentes modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  ( $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável) ao estudar as características do escoamento na esteira de uma barreira de vento em um terreno plano por meio de simulações numéricas. Os resultados dos modelos RNG e Realizável mostraram melhores resultados comparados ao  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão, contudo, os modelos subestimaram os resultados.

Para estudar o comportamento do escoamento ao redor de árvores individuais e regiões de florestas, Liu et al., (2018) utilizaram o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e encontraram satisfatória concordância com o experimental, no entanto, o modelo apresentou dificuldade em prever o escoamento próximo à vegetação. Trabalhos recentes mostraram que o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST forneceu melhores resultados do campo de velocidade e turbulência simulados em estudos de vegetação em relação ao modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  (DESMOND et al., 2014; DESMOND; WATSON; HANCOCK, 2017). Entretanto, os

trabalhos não apresentam uma análise detalhada das diferenças entre os modelos, apenas foi calculada a correlação entre os dados experimentais e numéricos para alguns perfis de velocidade.

A influência dos modelos de turbulência na previsão do escoamento em barreiras de vento não foi claramente avaliada nos estudos apresentados. Um número reduzido de trabalhos dedicaram-se a avaliar o desempenho do uso de diferentes modelos de fechamento da turbulência na precisão dos resultados do escoamento ao redor de diferentes tipos de barreira de vento (GUO; MAGHIRANG, 2012; SANTIAGO et al., 2007).

Na modelagem numérica, a resistência gerada pela barreira é descrita pela introdução de termos fonte na equação de conservação de quantidade de movimento. Os termos relativos à resistência inercial e à resistência viscosa estão associados à queda de pressão do escoamento do vento ao passar por uma barreira porosa (BITOG et al., 2012; GUO; MAGHIRANG, 2012; HONG; LEE; SEO, 2015). Essa estratégia é utilizada para modelar o escoamento de vento em barreiras de vento artificiais (*windfence*) e naturais (árvores e estruturas verdes em geral), sendo a principal diferença relacionada a modelagem do termo de resistência inercial entre os tipos de barreira de vento (artificial porosa e naturais).

A porosidade é definida com a razão entre a área aberta dos poros e a área total da barreira (SAN; WANG; QIU, 2018; YEH; TSAI; YANG, 2010). A relação da porosidade da barreira e do coeficiente de resistência tem sido descrita por equações empíricas desenvolvidas em estudos experimentais (SONG et al., 2014; YEH; TSAI; YANG, 2010; XU; CALAY; MUSTAFA, 2019) de forma a parametrizar a resistência imposta pela barreira de vento ao escoamento. Estudos mostram que a parametrização da resistência pode afetar os resultados observados no comportamento do escoamento em estudos de simulação numérica (DESMOND et al., 2014).

A porosidade representa um dos parâmetros aerodinâmicos que influenciam o comportamento do escoamento e a formação das regiões características desenvolvidas ao redor de barreiras artificiais e naturais (BRUNO; HORVAT; RAFFAELE, 2018; DONG et al., 2007; SAN; WANG; QIU, 2018). No entanto, em barreiras naturais, a porosidade não é suficiente para expressar o comportamento de resistência gerado pela barreira e sua interação com o escoamento. A porosidade representa apenas a estrutura geométrica plana

da barreira natural, enquanto o coeficiente de resistência é um parâmetro dinâmico que depende, além da porosidade, da forma dos elementos que a constituem (WANG; TAKLE; SHEN, 2001). Na modelagem numérica de barreiras verdes, o termo inercial é parametrizado como uma força de resistência ao escoamento que é adicionada ao volume de controle da malha computacional onde há vegetação, representando assim às interações da folhagem e atmosfera expresso em função da densidade de área foliar (do inglês *Leaf Area Density* – LAD) ( $m^2/m^3$ ) e do coeficiente de arrasto, parâmetros que fornecem as características morfológicas e aerodinâmicas da vegetação, respectivamente (BUCCOLIARI et al., 2018; ZENG et al., 2020).

A distribuição das folhas e estruturas internas que compõe a vegetação variam verticalmente, resultando na variação da intensidade das forças de resistência geradas pela vegetação. Estudos mostram que a modelagem da vegetação utilizando a distribuição vertical de LAD fornece melhor representação do efeito da resistência imposta pelos elementos da vegetação ao escoamento do vento, aumenta a precisão dos resultados e fornece melhor previsão da região de abrigo a ser protegida pela barreira (DESMOND et al., 2014; ZENG et al., 2020).

No presente trabalho, pretende-se avaliar a atenuação da velocidade do escoamento atmosférico e a formação da região de abrigo promovidas por barreiras de vento (artificiais sólidas ou porosas e naturais), fundamental para o controle da erosão eólica de materiais granulados. Será analisada a sensibilidade do campo de vento aos parâmetros morfológicos das barreiras naturais e a porosidade das barreiras artificiais. Para a modelagem do escoamento atmosférico através das barreiras de vento, serão investigadas diferentes formulações para implementação da barreira de vento (vegetal, artificial sólida e artificial porosa) e diferentes modelos de turbulência que permitam melhor acurácia e precisão na previsão do campo de ventos e de energia cinética turbulenta.

#### *Organização deste documento*

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. Após a Introdução, o Capítulo 2 resume os objetivos pretendidos no trabalho. O Capítulo 3 apresenta uma visão geral do padrão de escoamento ao redor de uma barreira de vento a partir dos campos de velocidade e turbulência. Uma revisão da literatura com estudos aplicados é apresentada ainda no Capítulo 3 a fim de contextualizar e corroborar a importância do trabalho bem

como listar as abordagens de modelagem mais comumente utilizadas para simular numericamente barreiras porosas. No Capítulo 4 são apresentados os cenários investigados, as equações de conservação e os modelos de turbulência utilizados, bem como as condições de contorno necessárias e os métodos numéricos aplicados à ferramenta computacional utilizada para solução das equações diferenciais. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos, as comparações com dados experimentais e as discussões acerca dos objetivos listados no Capítulo 2. O Capítulo 6 encerra esta dissertação apresentando as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a atenuação da velocidade do escoamento atmosférico e a formação da região de abrigo promovidas por barreiras de vento (artificiais sólidas e porosas e naturais) utilizadas para o controle da erosão eólica de materiais granulados.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar os parâmetros de implementação matemática e computacional (discretização do domínio, método numérico e condições de contorno) da solução das equações que governam a física do escoamento atmosférico turbulento alterado pelas barreiras de vento natural e artificial;
- Comparar os campos de velocidade e turbulência preditos por diferentes modelos recomendados para o estudo do escoamento atmosférico turbulento modificado por barreiras de vento;
- Analisar a influência dos parâmetros morfológicos de espécies vegetais que compõem uma barreira natural de atenuação da velocidade do escoamento atmosférico;
- Avaliar o fenômeno físico de redução da velocidade e modificação das estruturas do escoamento atmosférico turbulento para diferentes formas de implementação numérica da resistência gerada por barreiras artificiais porosas.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, primeiramente é apresentado uma importante caracterização do comportamento do escoamento turbulento modificado pela barreira vento, considerando as principais regiões formadas ao seu redor e as características dessas. Além disso, são destacados os parâmetros relevantes de estudos em barreiras de vento objetivando o controle da erosão eólica e terrenos e pilhas de materiais granulados, bem como as abordagens física e numérica empregada para avaliados desses estudos. Uma breve descrição dos principais temas encontrados na literatura sobre o escoamento em barreiras de vento é apresentado no Quadro 1. Nele são apresentados as abordagens e os aspectos relevantes usados neste tipo de estudo, os parâmetros considerados de acordo com o método de implementação da barreira de vento, referente a modelagem numérica das barreiras de vento (artificiais e naturais).

Quadro 1: Revisão da literatura e identificação dos principais aspectos avaliados nos estudos de barreira de vento (artificial e natural)

| <b>Trabalhos Barreira artificial</b>  | <b>Autores</b>         | <b>Trabalhos Barreira natural</b>   | <b>Autores</b>   |
|---|------------------------|---|--|
| Escoamento em barreira de vento artificiais (campo de velocidade e turbulência)   | Dong et al. (2007)     | Revisão de trabalho sobre a modelagem do escoamento em barreira natural   | Wang, Takle e Shen (2001)                                  |
|   | Dong et al. (2010)     |   |  |
|   | Mustafa et al. (2016)  | Estratificação da resistência da vegetação utilizando uma equação para o perfil vertical de LAD                   | Lalic e Mihailovic (2004)                                  |
|   | San, Wang e Qiu (2018) |   |  |
| Escoamento em barreira de vento artificial considerando o cálculo do coeficiente inercial por diferentes equações empíricas | Liu et al. (2014)      | Escoamento barreira natural por diferentes modelos RANS   | Rosenfeld, Marom e Bitan (2010)<br>Guo e Maghirang, (2012) |
|   |                        | Escoamento barreira natural utilizando $\kappa$ - $\omega$ SST  | Desmond, Watson e Hancock (2017)                           |
| Avaliação da predição do escoamento em barreira artificiais por diferentes modelos RANS                                     | Santiago et al. (2007) | Modelagem do escoamento em vegetação e barreira natural considerando as características morfológicas da vegetação | Desmond et al. (2014)                                      |
|   | Guo e Maghirang (2012) |   | Buccolieri et al. (2018)                                   |
|   | Hong, Lee e Seo (2015) |   | Liu et. al (2018)  |
|   | San, Wang e Qiu (2018) |   | Zeng et al. (2020)   |

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO AO REDOR DE UMA BARREIRA DE VENTO E SEUS PARÂMETROS RELEVANTES

As barreiras de vento se comportam como sumidouros de quantidade de movimento, modificando o escoamento ao seu redor e formando uma região de baixa velocidade a jusante da barreira, denominada região de abrigo. Assumindo escoamento bidimensional e perpendicular à barreira, o escoamento ao redor de uma barreira de vento pode ser dividido em regiões com base nas características da velocidade média e turbulência, conforme apresentado na Figura 1 (LYU; WANG; MASON, 2020; SPECKART; PARDYJAK, 2014).

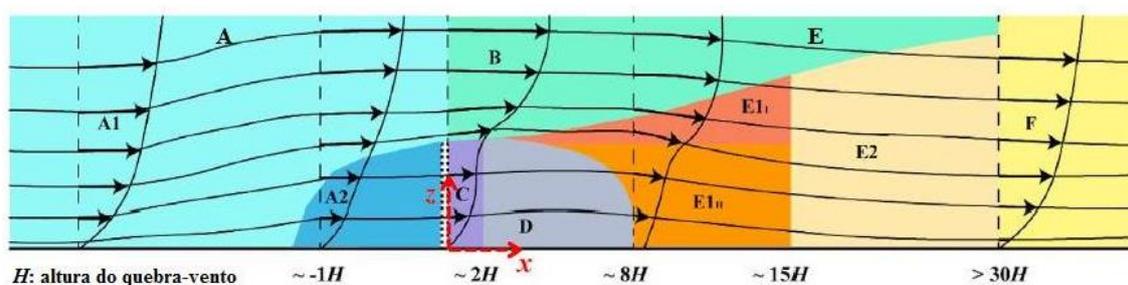


Figura 1: Esquema dos regimes e características do escoamento ao redor de um quebra-vento poroso bidimensional e perpendicular à direção do vento. Adaptado de Lyu; Wang; Mason (2020).

O perfil incidente de velocidade do vento a montante (região A) é associado ao escoamento não perturbado na camada limite atmosférica. À medida que o escoamento se aproxima da barreira de vento, a quantidade de movimento a montante da barreira é reduzida causando a diminuição da energia cinética e o aumento da pressão. Como consequência e devido à conservação de massa, uma velocidade vertical ascendente é induzida. Na região à jusante logo atrás da barreira (região C), o escoamento reduz a velocidade e no topo da barreira (região B), o escoamento acelera, resultando no deslocamento do perfil de velocidade. A porção de fluido que passa pelos poros da barreira esco da região C para uma zona de calmaria, denominada zona de abrigo (região D). Nessa região, a velocidade média e as flutuações turbulentas são pequenas em comparação ao perfil incidente. A zona de calmaria (esteira próxima) estende-se a jusante até uma determinada distância que varia de acordo com os parâmetros aerodinâmicos da barreira (DONG et al., 2007; DONG et al., 2010).

O perfil deslocado (região B) e a zona de esteira próxima (região D) interagem e formam a zona de mistura (região E), que é caracterizada pelo alto cisalhamento entre o perfil deslocado e a zona de abrigo. Mais adiante, o escoamento deslocado se reconecta ao solo e características de escoamento semelhantes aquelas da região A são restabelecidas (região F), formando a zona de reequilíbrio.

Lyu, Wang e Mason (2020) apresentaram uma subdivisão mais detalhada das regiões A e E. No entendimento dos autores, a região A pode ser subdividida em duas partes (região A1 e região A2), onde a região A1 está distante da barreira de vento e possui um perfil de velocidade do vento que reflete as condições do terreno, não sendo afetado pela presença da barreira. Enquanto a região A2, é a zona onde o perfil de velocidade é perturbado pela presença da barreira.

Outra importante subdivisão é apresentada na região E, zona de mistura do escoamento que faz parte da esteira que se forma a jusante da barreira. A esteira na região E é formada pela interação entre o escoamento deslocado sobre a barreira e o que passa através dela. Essa região é subdividida em duas zonas, zona intermediária E1 e a zona de esteira distante E2. A zona intermediária E1 apresenta uma importante variação de velocidade e pode ser subdividida verticalmente em esteira superior E1I, que possui velocidades e gradientes de velocidade altos e em esteira inferior E1II com menor velocidade em relação a região E1I (DONG et al., 2007). A quantidade de movimento do escoamento do vento na região E é então transferida para baixo em direção a superfície, levando ao recolamento no solo. Esse ponto marca a transição entre a região D e a região E.

Buscando o maior entendimento dos mecanismos relacionados à redução da velocidade causada pela presença de barreiras porosas, diversos estudos têm sido realizados, como ensaios experimentais em túnel de vento e medição em campo. Um dos primeiros estudos foi realizado por Bean, Alferi e Federer (1975). Nesse estudo, as características do escoamento desenvolvido ao passar pela barreira porosa foram avaliadas de acordo com a teoria formulada por Dyunin (1964) na qual o comportamento da velocidade a jusante de uma barreira porosa pode ser descrito em três regimes de escoamento distintos. A Figura 2 mostra o gráfico da velocidade do vento em função da distância a jusante de uma barreira porosa. O gráfico descreve os diferentes comportamentos do escoamento de acordo com os seguintes regimes: I) a velocidade de jato que passa pelos poroso da

barreira, que pode ser definido como *bleed flow* do inglês; (II) a mistura da porção de fluido que passa pelos poros que resulta na redução da velocidade até chegar a velocidade mínima ( $U_m$ ) na esteira próxima da barreira e; (III) a retomada da velocidade do escoamento, onde há transferência da quantidade de movimento do escoamento deslocado para a porção do fluido que atravessou os poros da barreira. Bean, Alferi e Federer (1975) compararam o resultado da estimativa analítica com medições de velocidade do vento a jusante de diferentes coberturas vegetais, que representaram porosidades distintas medidas em campo. Ademais, o estudo avaliou a formação da região de abrigo gerada pela barreira vegetal e os parâmetros que influenciam na formação dessa região. Dentre os resultados, observou-se que a velocidade de incidência do vento não apresentou significativa influência na geração da região de abrigo, fato atribuído as baixas e moderadas velocidades medidas no experimento, velocidades de 1,8 a 6,6 m/s. Quanto a porosidade, essa mostrou-se ser o fator governante da redução da velocidade do vento. Dessa forma, os autores sugerem que a porosidade é um fator que controla a redução da velocidade do vento na região jusante da barreira, enquanto o alcance dessa região depende da turbulência local.

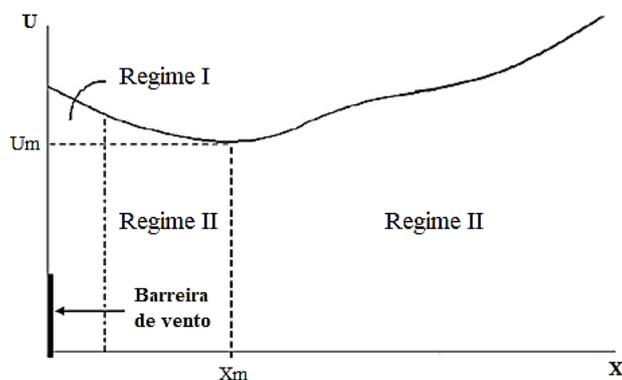


Figura 2: Escoamento do vento a jusante de uma barreira de vento porosa, três regimes distintos de fluxo. Adaptado de Bean, Alferi e Federer (1975).

A porosidade é destacada em diversos estudos como um importante fator na determinação do comportamento do escoamento e formação das diferentes regiões desenvolvidas ao redor de uma barreira de vento porosa (BRUNO; HORVAT; RAFFAELE, 2018; DONG et al., 2007; SAN; WANG; QIU, 2018). No entanto, os efeitos da porosidade no

escoamento e as alterações que as variações desses parâmetros causam, nas diferentes regiões do escoamento, necessitam de maior compreensão.

Wang et al. (2001) mostraram a relação do campo de velocidade e a porosidade ao examinar estudos anteriores apresentados na literatura que utilizaram modelagem numérica para estimar a redução de velocidade proporcionada pela passagem do escoamento por uma barreira vegetal. Na Figura 3 é apresentada a relação da redução da velocidade com a distância da barreira de vento em função da porosidade para uma barreira vegetal.

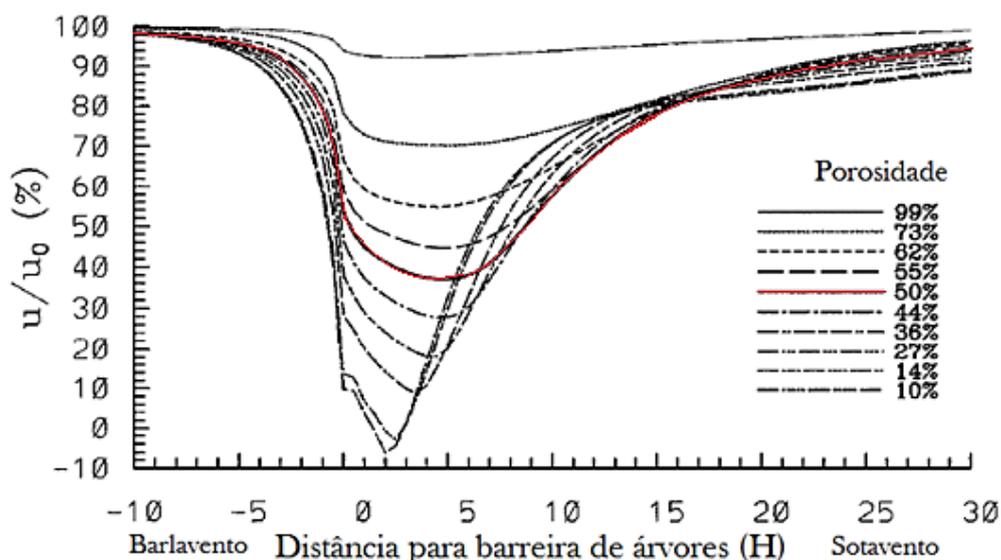


Figura 3: Descrição da redução da velocidade do escoamento na barreira vegetal ao longo da distância para diferentes porosidade. Adaptado de Wang; Takle; Shen (2001)

Na Figura 3 a barreira está posicionada em  $x=0$  e a velocidade é medida a  $0,5H$  do solo, sendo  $H$  a altura das árvores da barreira vegetal. A partir do gráfico na Figura 3 observa-se que a redução máxima da velocidade ocorreu entre  $1H$  e  $5H$  dependendo da porosidade, mas não imediatamente após a barreira. A redução da velocidade do vento é maior para barreiras com menor porosidade, no entanto, nota-se um retorno mais rápido da velocidade, resultando em uma menor região de proteção ( $0-10H$ ). Por exemplo, considerando-se que a região de abrigo é o local onde a velocidade é no mínimo 20% menor que a velocidade de referência medida a montante, no gráfico da Figura 3, a barreira com porosidade média (50%), fornece maior região de proteção ( $10-30H$ ).

Apesar da redução menos expressiva, ela causou uma redução lenta que se estende por uma distância maior.

Dong et al. (2007) avaliaram, dentre outros parâmetros, a relação do percentual de redução de velocidade e do tamanho da região de abrigo com a porosidade de uma barreira de vento artificial. Foi analisado o regime de escoamento a jusante de barreiras com diferentes porosidades por meio de experimento em escala reduzida de túnel de vento. Os experimentos utilizaram a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*) para medição do campo de velocidades e foram avaliadas as características do escoamento na região de esteira de um modelo de barreira para 11 (onze) diferentes porosidades (0,05 à 0,90) com velocidades médias do escoamento livre de 8 a 14 m/s. Dentre os resultados, observou-se que a região de recirculação e o alcance da zona de proteção formada a jusante da barreira apresentaram correlação com a porosidade. Assim, foi possível identificar uma relação específica entre as características médias do escoamento a jusante da barreira e sua porosidade. Para os casos investigados, foram identificadas porosidades críticas ou porosidades ideais no intervalo de 20% a 40%, pois nessa faixa houve uma combinação ótima entre a redução da velocidade do vento e a dimensão da região de abrigo.

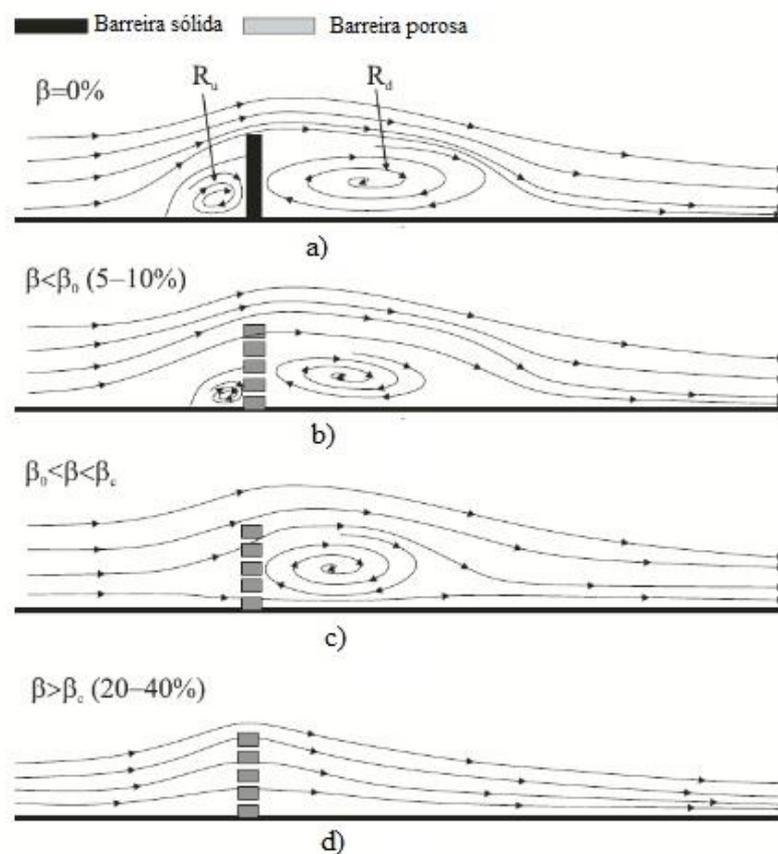


Figura 4: escoamento médio em torno de: (a) barreira sólida ( $\beta = 0\%$ ), (b) barreira porosa de porosidade muito baixa ( $\beta < \beta_0$ ), (c) barreira porosa de baixa porosidade ( $\beta_0 < \beta < \beta_c$ ) e (d) barreira de alta porosidade ( $\beta > \beta_c$ ). Adaptado de Bruno, Horvat e Raffaele (2018)

Na Figura 4 é apresentada a evolução do comportamento do escoamento do vento ao passar pela barreira em função da porosidade proveniente do trabalho publicado por Bruno, Horvat e Raffaele (2018). Para a porosidade  $\beta = 0\%$  (barreira sólida), observa-se na Figura 4a que o escoamento ao incidir na face da barreira sólida é deslocado, parte do escoamento flui em direção ao solo e ao encontrar com escoamento incidente forma um vórtice próximo a superfície ( $R_u$ ), enquanto que outra parte do escoamento é deslocado em direção ao topo da barreira e forma uma região de recirculação logo atrás da barreira sólida ( $R_d$ ). É importante destacar que a região de recirculação a jusante inicia no ponto de separação do topo da barreira e estende por uma grande região atrás dessa. À medida que a porosidade aumenta ( $\beta < \beta_0$ ) até a 10% (porosidade muito baixa) essas estruturas são alteradas, o vórtice frontal reduz de tamanho devido a maior passagem do ar pelos poros da barreira e a região de recirculação observada a jusante da barreira ( $R_d$ ) aumenta (Figura 4b), atingindo o valor máximo.

No intervalo  $\beta_0 < \beta < \beta_c$ , sendo  $\beta_c$ <sup>1</sup> o valor de porosidade crítica, nota-se que o comportamento do escoamento difere significativamente do anterior ( $\beta < \beta_0$ ) e do posterior ( $\beta > \beta_c$ ). Abaixo da porosidade crítica, o escoamento reverso ( $R_d$ ) torna-se significativo (Figura 4c), ao passo que valores superiores a essa ( $\beta > \beta_c$ ), o escoamento que passa pelos poros da barreira predomina. Isso resulta na insuficiente redução da velocidade do vento e a região de recirculação ( $R_d$ ) (Figura 4d).

Conforme verifica-se na Figura 4, a estrutura do escoamento atrás das barreiras porosas é determinada pela interação entre o escoamento que passa pelos orifícios das barreiras (*bleed flow*) e o escoamento deslocado que passa sobre as barreiras, assim, a razão entre a massa de fluido que atravessa os poros e a massa deslocada difere conforme a porosidade da barreira (SONG et al., 2014).

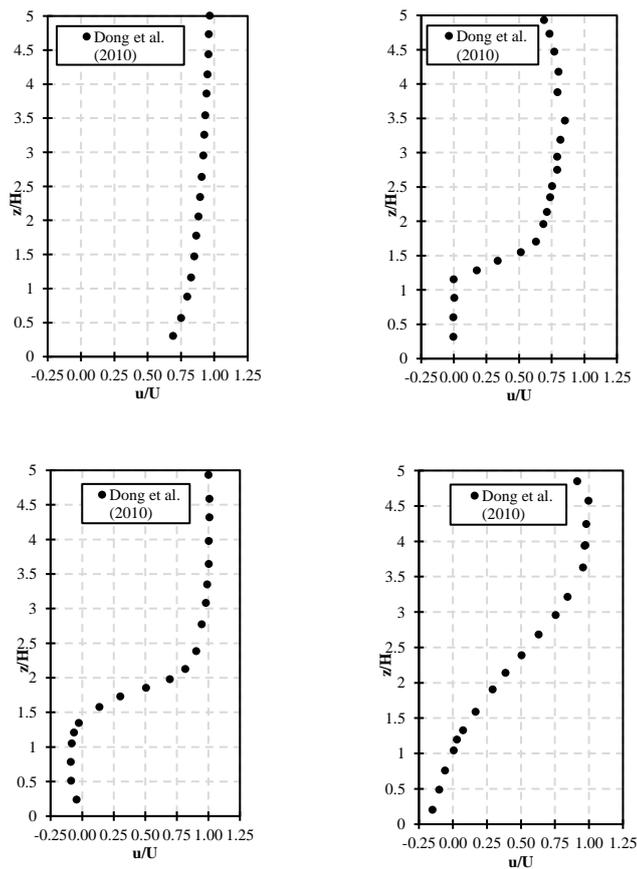
Segundo Mustafa et al. (2016), além da influência da porosidade da barreira de vento na redução da velocidade do vento, a porosidade influencia também a turbulência na região de abrigo criada jusante da barreira porosa. Assim, além do entendimento da redução da velocidade, o conhecimento do desenvolvimento da turbulência apresenta aspectos fundamentais para estudos e análises dos efeitos das barreiras no escoamento.

Dong et al. (2010) estudaram o comportamento da turbulência na região a jusante de uma barreira de vento artificial em túnel de vento sob diferentes porosidades (0,05 a 0,90) e velocidades médias de corrente livre (8 a 14 m/s). Dentre os objetivos do estudo, buscou-se identificar os parâmetros do escoamento relacionados a eficiência da região de abrigo (maior extensão com velocidade do vento reduzida) e a sua relação com a porosidade. A partir das medições detalhadas das componentes vertical e horizontal de velocidade obtidas por Velocimetria por Imagem de Partículas foram analisadas a vorticidade, intensidade da turbulência, tensão de Reynolds e energia cinética turbulenta, de forma a caracterizar os campos de turbulência a jusante das barreiras de vento. Os resultados obtidos mostraram que todos parâmetros investigados dependeram da porosidade da barreira, da velocidade do escoamento livre, da distância em relação a barreira e da altura em relação ao solo, exceto a intensidade da turbulência que foi independente da

---

<sup>1</sup> Porosidade crítica é entendida como a porosidade limite onde ocorre a variação do comportamento dominante do escoamento ao redor da barreira de vento, recirculação ou *bleed flow*.

velocidade da corrente livre. No geral, os parâmetros da turbulência analisados aumentaram com a diminuição da porosidade. A redução da velocidade média do escoamento do vento causada pela barreira aumentou com a diminuição da porosidade dessa. No entanto, ressalta-se que a redução da velocidade média gerou uma transferência de quantidade de movimento, onde a diminuição da componente longitudinal de velocidade levou ao aumento correspondente na componente vertical (Figura 5).



(a)

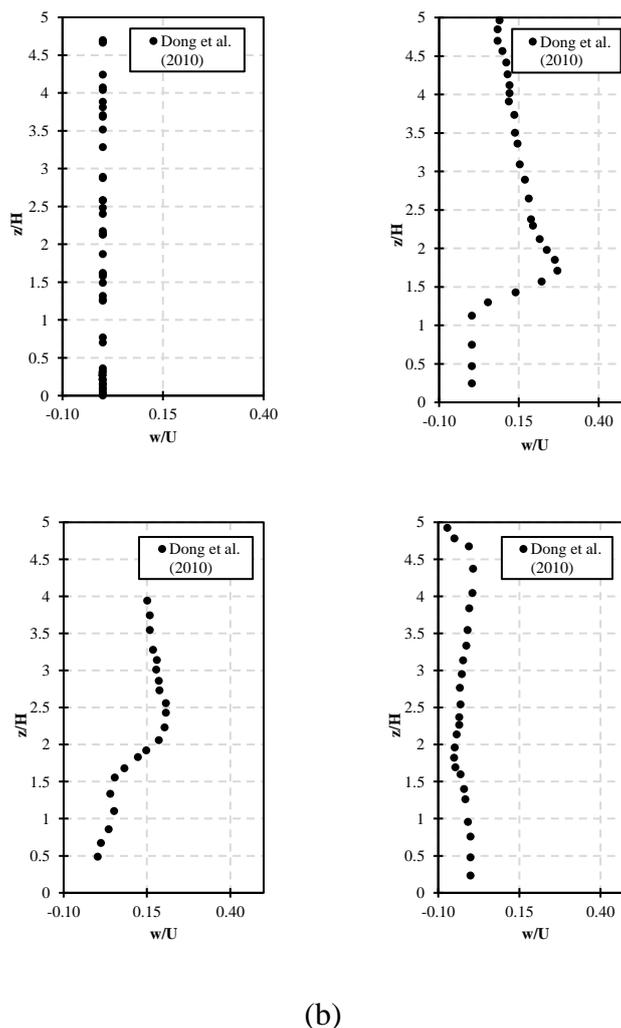


Figura 5: Perfis verticais das componentes (a) horizontal e (b) vertical de velocidades. Adaptado de Dong et al., (2010)

Mustafa et al. (2016) investigaram o comportamento do escoamento a jusante de diferentes barreiras porosas, por meio da medição de velocidade em vários pontos ao longo da linha central do túnel de vento. Um anemômetro ultrassônico capaz medir as três componentes da velocidade foi utilizado para determinação da velocidade, intensidade da turbulência e energia cinética turbulenta ao redor da barreira de vento. Três barreiras porosas com 23%, 35% e 45% de porosidade foram analisadas. Os resultados mostraram que a turbulência produzida pela barreira de vento foi sensível à porosidade para valores de porosidade inferior a 45%, acima desse valor o impacto na turbulência foi insignificante. Verificou-se que porosidade mais baixa tende a criar turbulência com maior intensidade que se propaga por longa distância a jusante da barreira. Esse aumento da turbulência na região de esteira afastada não é desejado, pois pode contribuir no

aumento da erosão e conseqüentemente emissão de partículas na superfície de pilhas de estocagem e/ou na ressuspensão de material particulado depositado no solo.

Basnet e Constantinescu (2017) estudaram em simulação numérica computacional o comportamento do escoamento médio e as estruturas de turbulência ao redor de uma barreira de vento artificial sólida e porosa (Figura 6). Dentre outros aspectos avaliados, a variação da dinâmica dos vórtices turbulentos em grandes escalas e a distribuição da velocidade de fricção na superfície de um canal, em função da porosidade da barreira ( $0\% < \beta < 36\%$ ) foram investigados utilizando o modelo LES. A interação do escoamento *bleed flow* com o escoamento deslocado, no topo da barreira de vento, resultou na formação de duas grandes recirculações na região de esteira da barreira, cuja extensão horizontal e vertical variou em função da porosidade. O comprimento e a altura do vórtice da recirculação principal diminuem gradativamente com o aumento da porosidade. Verifica-se que a recirculação principal apresenta as maiores extensões (altura e comprimento) para  $\beta=0\%$  e localiza-se próximo da barreira. Enquanto que para porosidades maiores ( $\beta=36\%$ ), a recirculação principal possui dimensões significativamente menores e está localizada mais distante da barreira. Os resultados mostraram ainda que a porosidade da barreira influenciou a distribuição da velocidade de fricção. O aumento da porosidade produziu o incremento do comprimento da região com reduzidos valores de velocidade de fricção na esteira próxima e recuperação lenta, o que aumentou o alcance da região de abrigo cuja velocidade de fricção é mais baixa.

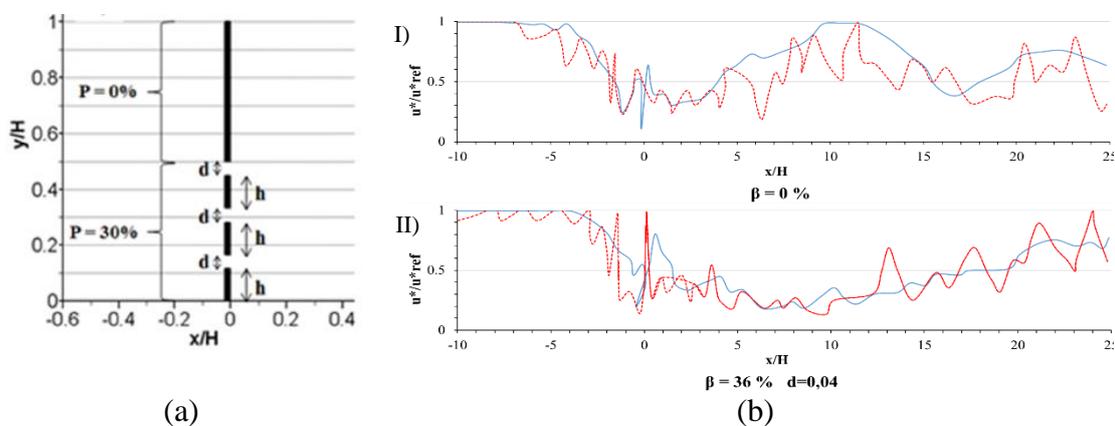


Figura 6: (a) Representação esquemática de barreiras sólida e porosa artificial e (b) resultado da distribuição da velocidade de fricção obtidas para escoamento modificado para uma (b-I) barreira sólida com  $\beta=0\%$  e (b-II) uma barreira porosa com 36% de porosidade, onde a linha azul é a distribuição da velocidade de

fricção adimensional do escoamento médio e a linha vermelha tracejada é a velocidade de fricção adimensional do escoamento instantâneo. Adaptado de Basnet e Constantinescu (2017).

San, Wang e Qiu (2018) avaliaram o desempenho do efeito de abrigo na região de esteira próxima e afastada (0–4H e 4H–10H) de uma barreira bidimensional isolada. A porosidade variou entre 2 a 60%, a qual foi identificada como sendo a principal variável na determinação do efeito de abrigo. Os resultados mostraram que a velocidade média a jusante de barreiras sólidas e porosas é reduzida de forma diferente ao longo da extensão da esteira de acordo com a porosidade. Para porosidade mais baixa (10,2%) a redução da velocidade média foi mais importante na esteira próxima, enquanto porosidade maior (35%), foi melhor para áreas mais afastadas. A porosidade também influenciou a energia cinética turbulenta (ECT) e que por sua vez influencia, a região de abrigo. Valores mais elevados de energia cinética turbulenta (ECT) ficaram concentrados em 1H e 3H (em z) para as porosidades avaliadas. Porosidades de 0% e 10,2% apresentaram resultados similares com baixa ECT na esteira próxima  $x/H > 4$  e valores elevados de ECT nas camadas superiores após a barreira. Enquanto que, em porosidades como 35%, os maiores valores de ECT foram localizados na esteira próxima, logo após a barreira e valores insignificantes na esteira afastada. As porosidades de 29,9% e 35% forneceram resultados semelhante com a maior parte da energia cinética turbulenta localizada em uma região relativamente pequena logo atrás da barreira e valores insignificantes nas outras áreas a jusante.

San, Wang e Qiu (2018) confirmaram os resultados encontrados por Dong et al. (2010) indicando que a porosidade está relacionada com os níveis de energia cinética turbulenta observados na esteira da barreira de vento. O aumento da porosidade reduz a turbulência nessa região, resultando em menores valores de energia cinética turbulenta. Outros estudos mostraram que o aumento da porosidade reduz a turbulência e influencia a distância de abrigo (DONG et al., 2010; MUSTAFA et al., 2016). No entanto, é importante ressaltar que barreiras com alta porosidade resultam em valores maiores de velocidade média no escoamento a jusante da barreira, não sendo efetivos relativamente a redução da velocidade do vento.

Assim, conclui-se que a presença de atenuadores de velocidade como barreiras de vento alteram significativamente os níveis de turbulência do escoamento e afetam as estruturas características do escoamento, sendo a porosidade o parâmetro principal na determinação

do efeito de proteção e na redução da velocidade causado pela barreira de vento (CHEN et al., 2014).

Para avaliação da efetividade de uma barreira de vento é importante a definição dos objetivos pretendidos com sua implantação, que implica na determinação da porosidade ideal para os resultados desejados. Para a determinação da porosidade ideal é necessária uma análise conjunta da redução da componente horizontal da velocidade do vento com o aumento correspondente da componente vertical da velocidade de forma a equilibrá-las com as modificações das estruturas turbulentas e a distância de abrigo (DONG et al., 2010; MUSTAFA et al., 2016; SAN; WANG; QIU, 2018).

### 3.2 TÉCNICAS DE MODELAGEM DO ESCOAMENTO AO REDOR DE BARREIRAS DE VENTO

A investigação de escoamento ao redor de barreiras de vento e os efeitos da porosidade no campo de velocidade pode ser realizada por meio de técnicas experimentais de ensaios em túnel de vento, medição de campo em escala real e modelagem numérica. Liu et al. (2014) destacaram as dificuldades da realização dessas em estudos de campo (em escala real), onde o controle das variáveis e a repetibilidade dos experimentos são apontados como principais limitantes. Experimentos em túnel de vento, no entanto, oferecem controle das condições de contorno como velocidade, turbulência, temperatura, pressão entre outras. A repetibilidade dos experimentos e o controle das condições do ambiente são as principais vantagens encontradas nos experimentos em túnel de vento, tornando essa técnica eficaz para investigação da influência da implantação de atenuadores de velocidade no escoamento, bem como os efeitos da porosidade no campo de vento. No entanto, experimentos em túnel de vento apresentam dificuldade em obter informações detalhadas próximo da barreira e a utilização de métodos de medição intrusivo podem alterar o comportamento e fornecer resultados não fidedignos.

Nesse sentido, a modelagem numérica tem provado ser um método confiável para estudar o escoamento ao redor de uma barreira de vento e avaliar seu efeito de proteção em campos abertos (DONG et al., 2007; DONG et al., 2010), assim como em pilhas de estocagem em áreas industriais (CONG et al., 2011; NOVAK et al., 2015). Essa técnica

permite analisar mais facilmente a influência de diferentes parâmetros, como parâmetros meteorológicos (direção e velocidade do escoamento atmosférico) e geométricos. Essas vantagens fazem da modelagem numérica um importante método aplicado a estudos que avaliam a eficiência e otimização do uso das barreiras de vento (CONG et al., 2011; NOVAK et al., 2015; SAN; WANG; QIU, 2018; SONG et al., 2014; YEH; TSAI; YANG, 2010). Na literatura é encontrado um grande número de trabalhos que investigaram diferentes aspectos do escoamento na presença de uma barreira de vento utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional.

Liu et al. (2014) avaliaram dentre outros objetivos a capacidade da modelagem numérica na previsão do escoamento ao redor de um modelo de barreira de vento. A comparação entre um modelo experimental em reduzida e um modelo em escala real foi realizada em simulação numérica computacional. O modelo de fechamento da turbulência  $\kappa\text{-}\omega$  SST foi utilizado para predição do escoamento turbulento. Os resultados da simulação numérica foram comparados aos dados experimentais em túnel de vento da literatura para validação. Os resultados da simulação numérica, de forma geral, apresentaram características semelhantes aos dados da literatura no experimental em túnel de vento, incluindo padrões de escoamento, perfis de velocidade e regiões do escoamento, comprovando a alta precisão e confiabilidade do método na representação do campo de escoamento. No entanto, a ausência de proporcionalidade das estruturas turbulentas geradas próximo as barreiras foram observadas entre os modelos em escala de túnel de vento (escala reduzida) e escala real nas simulações numéricas realizadas. Assim, os autores sugerem que os resultados dos experimentos em escala reduzida em barreira de vento não devem ser extrapolados diretamente para escala real, sendo necessário o tratamento das escalas da turbulência pelo uso de modelos adequados.

A escolha do modelo de fechamento da turbulência utilizado na modelagem é de grande importância, uma vez que as características e limitações dos modelos de turbulência afetam o resultado final do escoamento simulado. Alguns trabalhos investigaram o desempenho de diferentes modelos de turbulência na modelagem do escoamento na presença de barreiras de vento (BITOG, et al., 2012; HONG; LEE; SEO, 2015; SAN; WANG; QIU, 2018; SANTIAGO et al., 2007).

Santiago et al. (2007) avaliaram o desempenho de diferentes modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  ( $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável) ao estudar as características do escoamento na esteira de uma barreira de vento em um terreno plano por meio de simulações numéricas. A influência da porosidade da barreira foi avaliada de forma a determinar a porosidade ideal para o efeito de proteção em uma barreira isolada. A porosidade analisada variou de 0% a 50%. Os resultados mostraram que os três modelos utilizados não apresentaram diferenças significativas para a velocidade média quando comparados aos dados experimentais. No entanto, na análise da razão do pico de velocidade (parâmetro calculado pela velocidade média e a flutuação turbulenta) os modelos RNG e Realizável mostraram melhores resultados comparados ao  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão. Os resultados preditos entre os modelos são destacados variações importantes, como por exemplo, a maior subestimação da razão do pico de velocidade pelo RNG. Fato atribuído as modificações realizadas no modelo para correção da produção de energia cinética turbulenta. Além disso, os modelos RNG e Realizável apresentaram maior concordância com o aumento da porosidade da barreira e 35% foi a porosidade mais eficiente na função de abrigo para as condições de escoamento simuladas, gerando melhor efeito de abrigo a curtas e longas distâncias.

Guo e Maghirang (2012) utilizaram simulação numérica na predição do escoamento atmosférico. Os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  (Padrão e Realizável) foram utilizados para simulação do escoamento atmosférico na presença da barreira de vento para avaliação da região de abrigo formada a jusante da barreira. As características do campo de escoamento foram avaliadas para tipos diferentes de barreiras, barreira artificial porosa e barreira natural. A partir da análise dos resultados, observou-se que a barreira artificial porosa e a barreira natural apresentaram resultados similares com boa predição da região abrigada. Os modelos apresentaram diferenças nos resultados preditos, especialmente na localização da velocidade mínima na esteira, onde em  $z=0,2H$  a velocidade mínima foi predita em  $2 < x_{\min}/H < 5$  para  $\kappa$ - $\epsilon$  Padrão e em  $3 < x_{\min}/H < 9$  para  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável. É importante destacar que os modelos apresentaram diferenças na velocidade predita em outras regiões, como velocidade menor a jusante da barreira e velocidade mais altas na região acima da barreira pelo modelo Realizável em relação ao modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Padrão. Contudo, a diferença de predição entre os modelos não foi considerada e o trabalho indica que ambos os modelos apresentaram bom desempenho na predição do escoamento.

Hong, Lee e Seo (2015) investigaram experimentalmente em túnel de vento e numericamente os efeitos de uma barreira porosa artificial na redução da velocidade do vento. Para as simulações numéricas, a capacidade de predição do campo de escoamento por diferentes modelos de turbulência ( $\kappa$ - $\epsilon$  padrão,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\epsilon$  de baixo Re) foi avaliada e os resultados comparados aos dados obtidos em túnel de vento. Os resultados apresentaram valores semelhantes de erro relativo calculados entre os modelos e os dados experimentais (erro < 6%), destaque para o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG que apresentou erro relativo de 5,39%, o menor erro para os casos avaliados.

San, Wang e Qiu (2018), dentre outros objetivos, avaliaram o desempenho de modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\omega$  SST e RSM na capacidade de predição das características do escoamento a jusante da barreira porosa. A capacidade de predição dos modelos foi analisada baseada no campo de velocidade médio comparando os resultados simulados aos dados experimentais. Os perfis de velocidade apresentaram boa concordância para todos os modelos avaliados, sem significativas diferenças entre eles. Entretanto, o modelo RSM é destacado pelos autores devido a sua melhor precisão da redução vertical de velocidade observado na esteira da barreira de vento.

Os trabalhos apresentados reforçam a importância da avaliação dos modelos de turbulência, bem como suas potencialidades e limitações na modelagem do escoamento atmosféricos. Esses confirmam a influência dos modelos de turbulência nos resultados do escoamento formado ao redor de barreiras de vento. Porém, o detalhamento de como a descrição da modelagem da turbulência realizada pelos modelos afeta o comportamento das estruturas turbulentas desenvolvidas na vizinhança da barreira de vento e as deficiências dos modelos que podem causar nos resultados finais da simulação, não foram esclarecidos pelos autores nestes trabalhos.

Outro ponto importante a destacar, é que apesar da importância da escolha do modelo de turbulência no resultado do campo de escoamento, estudos de simulação numérica em barreira de vento tem mostrado que fatores como a estratégia de parametrização do coeficiente de resistência inercial podem afetar a formação das regiões características identificadas na vizinhança de barreiras de vento. A correta identificação dessas é um dos fatores determinantes para melhor compreensão do escoamento e avaliação da capacidade de proteção proporcionada pela barreira de vento. Assim, equações e parâmetros

influenciadores na modelagem numérica do escoamento em barreira de vento são importantes fatores a serem avaliados, assim como a interferência dos aspectos da modelagem dos modelos de turbulência utilizados na simulação numérica são relevantes para determinação da melhor abordagem de estudo em barreiras de vento.

O detalhamento de diferentes abordagens para modelar o efeito de resistência imposto pela barreira de vento será apresentado nos parágrafos seguintes.

O efeito físico de um meio poroso no escoamento é uma queda de pressão. O meio poroso cria resistência ao escoamento, constituindo assim um sumidouro de quantidade de movimento (CONG et al., 2011). A barreira de vento promove a diminuição da quantidade de movimento do escoamento e conseqüente redução da velocidade do vento na região a jusante da barreira, proporcionando assim o efeito de abrigo nesta região. A resistência gerada pela barreira porosa pode ser introduzida na equação de quantidade de movimento em termos de resistência inercial e viscosa dada pela equação (1) (BITOG et al., 2012; GUO; MAGHIRANG, 2012; HONG; LEE; SEO, 2015).

$$\Delta p = - \left( \frac{\mu}{\alpha} \right) u_i + \frac{1}{2} C_i \rho U u_i \quad (1)$$

onde  $\Delta p$  é a queda de pressão gerada pela barreira porosa ( $\text{kg/m.s}^2$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg/m.s}$ ),  $\alpha$  é a permeabilidade ( $\text{m}^2$ ),  $U$  é a magnitude da velocidade média ( $\text{m/s}$ ),  $u_i$  ( $i=1,2,3$ , indicando as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) é a velocidade média de  $U$  na direção  $i$  ( $\text{m/s}$ ) e  $C_i$  é o coeficiente de resistência inercial (adimensional) (GUO; MAGHIRANG, 2012; KIM et al., 2018).

O termo  $\frac{\mu}{\alpha} u_i$  é a lei de Darcy para o meio poroso, que calcula a resistência exercida pela barreira porosa devido à viscosidade do fluido. O termo  $\frac{1}{2} C_i \rho U u_i$  calcula a perda inercial do fluido que passa através do meio poroso. Ao considerar o escoamento como turbulento o termo de resistência viscosa pode ser negligenciado, pois a sua ordem de grandeza é muito pequena quando comparado ao termo inercial (BITOG. et al., 2012; GUO; MAGHIRANG, 2012; LIU et al., 2014; XU; CALAY; MUSTAFA, 2019).

Esta equação é utilizada para modelar o escoamento do vento em barreiras artificiais (*windfence*) e naturais (árvores e estruturas verdes em geral), na qual a principal diferença está relacionada a modelagem do termo de resistência inercial.

Barreiras artificiais do tipo *windfence*, geralmente são tratadas como um meio poroso no qual a resistência ao escoamento é expressa pelo coeficiente de perda de pressão  $k_r$  (SANTIAGO et al., 2007; SONG et al., 2014; YEH; TSAI; YANG, 2010). O coeficiente de perda de pressão ( $k_r$ ) pode ser calculado a partir de diferentes equações em função da porosidade da barreira. A porosidade é definida com a razão da área aberta dos poros sobre área total da fence (LEE; LIM, 2001; SAN; WANG; QIU, 2018; YEH; TSAI; YANG, 2010).

O escoamento do vento ao passar por um meio poroso em uma barreira porosa pode ser estimado pela porosidade ( $\beta$ ). Dessa forma, o coeficiente de resistência é definido em função da porosidade da barreira. Algumas fórmulas empíricas são utilizadas para expressar essa relação e estimar o valor do coeficiente de resistência. A seguir são apresentados trabalhos na literatura que utilizaram diferentes equações.

Várias formulações são encontradas na literatura e tem sido usada para expressar essa relação. Song et al. (2014) estimaram o coeficiente de resistência inercial a partir da equação (2):

$$k_r = \frac{1}{c^2} \frac{(\beta^2 - 1)}{B} \quad (2)$$

onde  $c$  é uma constante determinada em função do número de Reynolds que assume-se, o valor de 0,98. Considerando  $Re = UB/v$ , temos que  $B$  é a espessura da barreira (m) e  $\beta$  é a porosidade da barreira calculada pelo percentual da área aberta em relação a área total da barreira porosa.

San, Wang e Qiu (2018) utilizaram o coeficiente de resistência da barreira fornecido por Reynolds nas simulações do modelo. A equação utilizada é dada por:

$$k_r = 0,5 \frac{3}{(2\beta - 1)^2} \quad (3)$$

$$k_r = \frac{1,04 (1 - \beta^2)}{\beta^2} \quad (4)$$

Xu, Calay e Mustafa (2019) calcularam o termo inercial a partir da equação  $C_i = k_r/B$ , onde o  $k_r$  foi estimado pela relação de Reynolds descrita como:

$$k_r = \frac{0,52 (1 - \beta^2)}{\beta^2} \quad (5)$$

onde  $B$  é a espessura da barreira porosa.

Yeh, Tsai e Yang (2010) calcularam o coeficiente resistência utilizando uma equação empírica dada pelo: diâmetro dos poros, coeficiente de fricção, porosidade e número de Reynolds.  $C_i$  ( $\approx \zeta/B$ ) é o coeficiente de resistência inercial que foi calculado pela equação empírica dada por:

$$\zeta_{1KB} = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \omega_1^2}{2}} = \left[ \zeta_0 + \lambda \frac{B}{d_r} \right] \frac{1}{\beta^2} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \omega_1^2}{2}} = \zeta_\phi \frac{1}{\beta^2} + \overline{\varepsilon_{0Re}} \zeta_{1KB} \quad (7)$$

onde  $\zeta_0$  é uma constante determinada a partir da tabela apresentada no estudo.  $B$  é a espessura da barreira,  $d_r$  é o diâmetro hidráulico,  $\lambda$  é o coeficiente de fricção calculado pelo número Reynolds ( $=0,3164 / Re^{0,25}$ ),  $\beta$  é a porosidade e  $\zeta$  é o valor correto tabelado dado em função de  $Re$ , o qual será melhor detalhamento no próximo capítulo.

De forma geral, os trabalhos mostraram satisfatória capacidade em reproduzir o escoamento do vento ao passar por uma barreira porosa e boa concordância com os dados dos experimentos. Entretanto, nenhum deles avaliaram a equação que melhor se ajustasse ao experimental, assim como não analisaram o efeito que diferentes formulações empíricas causam no resultado final da formação e caracterização do escoamento turbulento ao redor da barreira.

Liu et al. (2014) simularam o escoamento em uma barreira de vento porosa utilizando diferentes equações no cálculo de estimativa do termo de resistência inercial. O coeficiente de resistência inercial foi calculado por duas diferentes formulações empíricas, equações (3) e (5), para um intervalo de porosidades de 5% a 60% e os resultados comparados entre si. Os resultados apresentaram diferenças significativas para altas porosidades. Por exemplo, para  $\beta = 60\%$  a diferença no valor estimado foi de 40%, porém, essa diferença reduziu gradativamente para porosidades menores, obtendo resultados semelhantes na estimativa dos valores dos coeficientes calculados para baixas porosidades. Apesar de utilizar diferentes formulação para estimativa do cálculo do coeficiente de resistência inercial, este foi modelado considerando a média entre os valores fornecidos pelas relações. Sendo assim, a influência das formulações na modelagem do escoamento não avaliada, bem como o impacto nos resultados de redução da velocidade e formação das regiões características ao redor da barreira.

Assim, apesar das várias formulações disponíveis encontradas na literatura fornecerem resultados satisfatórios aos dados medidos nos experimentos de túnel de vento, há necessidade da investigação dos efeitos que essas formulações podem causar no resultado final do comportamento do escoamento turbulento desenvolvido ao redor de uma barreira de vento artificial porosa, bem como seu impacto na determinação da redução da velocidade média e na formação das estruturas turbulentas.

A porosidade em barreiras naturais, no entanto, não é suficiente para expressar o comportamento de resistência gerado por essa e sua interação com o escoamento. A porosidade representa apenas a estrutura geométrica plana da barreira natural, enquanto o coeficiente de resistência é um parâmetro dinâmico que não depende somente da porosidade, mas também da forma dos elementos que a constituem (WANG; TAKLE; SHEN, 2001).

Assim, diferentes abordagens têm sido utilizadas para a modelagem numérica do escoamento em barreiras naturais. Salim, Schlünzen e Grawe (2015) avaliaram o efeito da inclusão de árvores na simulação numérica do escoamento atmosférico em área urbana. Três abordagens foram avaliadas pelos autores para incluir o efeito dinâmico das árvores: a abordagem básica (efeitos de árvore são negligenciados), a abordagem implícita (efeitos de árvore são incluídos na superfície por parametrizações) e a abordagem explícita (as

árvores são representadas por meio poroso). Os resultados mostraram efeitos significativos da presença das árvores quando a abordagem explícita é usada em comparação com as abordagens básica e implícita. Destaca-se assim, a importância de considerar pela abordagem explícita nos efeitos das árvores em investigações do escoamento de vento em áreas urbanas por modelos numéricos.

Estudo desenvolvido por Buccolieri et al. (2018) apresenta uma revisão sobre as parametrizações atuais utilizadas na modelagem numérica do escoamento através da vegetação presente na área urbana. Nesta revisão, a maioria dos estudos apresentados utilizaram a abordagem explícita. Neste tipo de abordagem, a geometria da vegetação não é resolvida exatamente, no entanto, o efeito da redução da velocidade do vento é parametrizado por termos locais de sumidouros tridimensionais adicionados à equação de momentum.

De forma semelhante, nos estudos de simulação de atenuadores da velocidade do vento com a utilização de vegetação, o objetivo é descrever o efeito de redução da velocidade devido à resistência que o vento sofre pela vegetação. Não sendo necessário o tratamento em detalhes dos elementos sólidos (tronco, galhos e folhas) que constituem a vegetação, considerando-os assim como um efeito agregado, computado por uma força de resistência ao escoamento, descrito na forma de um termo de resistência inercial baseado nos parâmetros morfológicos característicos da vegetação (ROSENFELD; MAROM; BITAN, 2010; WANG; TAKLE; SHEN, 2001; ZENG et al., 2020).

O termo inercial é, portanto, parametrizado como uma força de resistência ao escoamento que é adicionada a célula da malha onde há vegetação, representando assim às interações da folhagem e atmosfera expresso em função da densidade de área foliar LAD ( $m^2/m^3$ ) da vegetação. A vegetação é tratada como um meio poroso e o efeito de arrasto da vegetação no escoamento de ar é descrito pelo uso de termos sumidouros ( $S_{ui}$ ) adicionado às equações de conservação para momento médio expresso como (BUCCOLIERI et al., 2018a; ZENG et al., 2020):

$$S_{ui} = - \rho \text{LAD} C_D U u_i \quad (8)$$

onde o termo fonte  $S_{ui}$  na equação do *momentum* representa a absorção da quantidade de movimento devido ao atrito aerodinâmico nos elementos da folhagem,  $\rho$  é a densidade do

ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u_i$  é a componente da velocidade média do vento (m/s),  $U$  é a velocidade média do vento (m/s) e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto da vegetação (adimensional). O coeficiente de arrasto é uma constante relacionada às características aerodinâmicas da vegetação. Sendo assim, o coeficiente de resistência é modelado em função da densidade da área foliar (LAD)<sup>2</sup> e o coeficiente de arrasto da árvore, conforme a relação (ZENG et al., 2020):

$$C_i = \text{LAD } C_D \quad (9)$$

Além do efeito na redução da velocidade, a vegetação também modifica o movimento médio do escoamento na turbulência da esteira de árvores, onde a menor escala de comprimento comparada com a turbulência gerada pelo cisalhamento induz a uma rápida dissipação. Estes processos também são parametrizados, sendo geralmente descrito por termos fontes e sumidouro de energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ), termos da taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ) (BUCCOLIERI et al., 2018a; ZENG et al., 2020) e/ou taxa de dissipação específica ( $\omega$ ) (CARLOS; LOPES, 2007; SOGACHEV, 2009).

$$S_\kappa = \rho \text{LAD } C_D \left( \beta_p U^3 - \beta_d U \kappa \right) \quad (10)$$

$$S_\varepsilon = \rho \text{LAD } C_D \left( C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{\kappa} U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U \varepsilon \right) \quad (11)$$

$$S_\omega = \rho \text{LAD } C_D \left[ (C_{\varepsilon 4} - 1) \beta_p \frac{\omega}{\kappa} U^3 - (C_{\varepsilon 5} - 1) \beta_d U \omega \right] \quad (12)$$

onde  $\beta_p$  é a fração de energia cinética média convertida em energia cinética turbulenta por meio de arrasto e leva um valor entre 0 e 1,  $\beta_d$  é o coeficiente adimensional para o curto-circuito da cascata de turbulência. Esses dois coeficientes denotam dois processos físicos que modificam o espectro de energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ) pelo dossel das árvores e, portanto, são refletidos no termo fonte da energia cinética turbulenta (ZENG et al., 2020).  $C_{\varepsilon 4}$  e  $C_{\varepsilon 5}$  são coeficientes de correção do termo fonte da taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ), pois o termo fonte da taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) e taxa de dissipação específica

---

<sup>2</sup> LAD: Densidade de Área Foliar que é definida como a área foliar unilateral total por unidade de volume da camada de dossel.

( $\omega$ ) são extensões modificadas da relação de Kolmogorov com base no termo fonte da ECT (ZENG et al., 2020).

De forma geral,  $\beta_p$  é geralmente considerado igual a 1 e os valores de  $\beta_d$ ,  $C_{\epsilon 4}$  e  $C_{\epsilon 5}$  variam entre 4 - 6,5; 0,9 - 2 e 0,9 - 1,8, respectivamente. No entanto, os valores ótimos desses parâmetros dependem do estudo, pois não há evidências de que um desses conjuntos de parâmetros forneça melhores resultados para casos gerais (BUCCOLIERI et al., 2018). Entretanto, Zeng et al. (2020) destacam o impacto desses coeficientes nos termos fontes de produção e dissipação de turbulência, sugerindo assim, valores de coeficiente que apresentaram melhores resultados em estudos numéricos.

A capacidade de predição em CFD dos efeitos aerodinâmicos da vegetação no escoamento do vento foi avaliada utilizando diferentes modelos de fechamento da turbulência com adição de termo fonte e sumidouro para variadas formulações (MOCHIDA et al., 2008; ZENG et al., 2020). No geral, os estudos destacam o uso das formulações dos modelos com termos de produção e dissipação na modelagem da turbulência para vegetação descritos nas equações (10) a (12).

Mochida et al. (2008) classificaram as equações utilizadas para modelar o termo fonte de turbulência em quatro tipos. Destacando dois tipos, um cujo o termo fonte de dissipação de energia cinética é descrito pela escala de comprimento ( $L$ ) e não há consideração da perda de energia no termo de  $S_\kappa$ , apenas a produção de energia ( $P_\kappa$ ). O outro que considera a produção ( $P_\kappa$ ) e a perda de energia cinética ( $D_\kappa$ ) pela vegetação no termo fonte de  $\kappa$  e descreve a dissipação de energia cinética em função dos termos de produção e perda de energia de  $\kappa$ . Os resultados obtidos a partir dos modelos de dossel na simulação numérica foram comparados com os dados de medição de campo realizados na zona de esteira da vegetação, considerando as medições em uma única árvore. Observou-se que a modelagem com apenas o termo de produção forneceu boa concordância com dados medidos para os perfis de velocidade média, entretanto, o modelo com inclusão dos termos de produção e perda apresentou melhor ajuste na distribuição de energias cinética turbulenta. Dessa forma, os autores sugerem que a escolha da forma de modelagem deve ser feita baseada no melhor ajuste para aspecto de maior interesse a ser avaliado por cada trabalho.

Zeng et al. (2020) avaliaram em um estudo de microclima urbano a sensibilidade do termo fonte utilizado na simulação numérica para modelagem do efeito da vegetação no escoamento. No trabalho, o escoamento do dossel<sup>3</sup> foi modelado baseado nas propriedades aerodinâmicas das árvores descritas por meio de termos fonte de *momentum* e de turbulência. Os resultados mostraram que termos de fontes de turbulência apresentam menor impacto na previsão da velocidade média, pois a parametrização do dossel com adição do termo fonte de *momentum* forneceu resultados semelhantes aqueles quando os termos fonte de turbulência foram incorporados. Isso indica a viabilidade de usar um método de modificação mais direto nas simulações de microclima com vegetação, adicionando apenas termos de fonte de momentum. No entanto, os resultados da simulação concordam apenas qualitativamente, uma vez que o processo de produção e dissipação de energia cinética turbulenta induzida pela vegetação não foi considerado.

Vários trabalhos encontrados na literatura modelaram os efeitos que afetam a turbulência gerada pelo vento através da vegetação utilizando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão e suas modificações (GUO; MAGHIRANG, 2012; ROSENFELD; MAROM; BITAN, 2010). Trabalhos mais recente, no entanto, mostraram que o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST forneceu melhores resultados do campo de velocidade e turbulência simulados em estudos de vegetação em relação ao modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  (DESMOND et al., 2014; DESMOND; WATSON; HANCOCK, 2017). A comparação entre os modelos de turbulência apresenta diferenças relevantes para o estudo de barreiras de vento, especialmente para a redução da velocidade na esteira.

A resistência gerada pela vegetação ao escoamento é expressa pelo coeficiente de resistência inercial, o qual é parametrizado em função da densidade de área foliar (LAD) e do coeficiente de arrasto da vegetação ( $C_D$ ). As características aerodinâmicas fornecidas por esses parâmetros (LAD e  $C_D$ ) são obtidos a partir de estudos experimentais de campo e em túnel de vento encontrados na literatura de acordo com as características da vegetação (ABHIJITH et al., 2017; BUCCOLIERI et al., 2018).

Estudos experimentais de campo e em túnel de vento foram realizados para obtenção de fatores como: LAD, porosidade e coeficiente de arrasto ( $C_D$ ), além de outros parâmetros

---

<sup>3</sup> Dossel é a cobertura superior da vegetação formada pelas copas das árvores.

que fornecem as características aerodinâmicas e morfológicas da vegetação (BITOG et al., 2011; JONCKHEERE et al., 2004; MANICKATHAN et al., 2018; MIRI; DRAGOVICH; DONG, 2017, 2018).

Estudos mostram que a densidade da cobertura vegetal é um fator determinante que influencia diferentes aspectos da dinâmica do escoamento dentro da região de vegetação e especialmente na redução da velocidade (FINNIGAN, 2002; RAUPACH, 1992). Assim, o entendimento desse parâmetro na formação da região de proteção gerada a jusante da vegetação tem sido avaliado em diversos trabalhos.

Miri, Dragovich e Dong (2017) avaliaram em túnel de vento a resposta da vegetação no escoamento do ar e como isso influencia na eficiência da redução de velocidade. O estudo buscou entender como as respostas aerodinâmicas e morfológicas de diferentes tipos de plantas e densidades impactam na redução da velocidade e contribui de forma eficiente no controle da erosão. Os resultados mostraram que a baixa densidade forneceu uma resposta mais efetiva que as demais densidades avaliadas. A medida que a velocidade aumentou os resultados mostraram que a diferença entre as maiores densidades (média e alta) foi menor, apresentando valores de redução de velocidade semelhantes entre elas. Outra análise interessante foi a avaliação da capacidade de redução de velocidade com a morfologia (dimensões). Os resultados mostraram que o aumento da velocidade reduziu a área frontal da planta, modificando a capacidade de proteção causada pela vegetação nas áreas próximas e afastadas na esteira. Assim, concluiu-se que a vegetação sofre modificações na sua morfologia capazes de alterar o efeito de proteção causado por ela, como a diminuição da velocidade do escoamento (MIRI; DRAGOVICH; DONG, 2018).

A variação do coeficiente de resistência inercial com a altura fornece uma melhor representação do efeito de resistência imposto pelos elementos da vegetação ao escoamento do ar (DESMOND et al., 2014; ZENG et al., 2020). Lalic e Mihailovic (2004) definiram uma relação empírica para a descrição da distribuição vertical da densidade de área foliar que forneça uma melhor estimativa do coeficiente de transferência da turbulência dentro da região da copa das árvores e acima dela. Os resultados mostram que a variação do LAD com a altura é modelada de acordo com a curva dada pela equação (13):

$$LAD(z) = LAD_{m\acute{a}x} \left( \frac{H - H_{m\acute{a}x}}{H - z} \right)^N \exp \left[ N \left( 1 - \frac{H - H_{m\acute{a}x}}{H - z} \right) \right] \quad (13)$$

onde, H é a altura da árvore,  $LAD_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo de LAD e  $H_{m\acute{a}x}$  é a altura de LAD máximo. N varia de acordo com a formação da vegetação, representando a abertura da região de folhas da vegetação, sendo o intervalo apresentado na equação (14) os valores que apresentaram melhor concordância para série de dados avaliados no estudo (LALIC; MIHAJLOVIC, 2004).

$$N = \begin{cases} 6 & 0 \leq z \leq H_{m\acute{a}x}, \\ \frac{1}{2} & H_{m\acute{a}x} \leq z \leq H. \end{cases} \quad (14)$$

A influência da introdução de parâmetros aerodinâmicos da vegetação na investigação da região de proteção formada a jusante da barreira natural foi avaliada numericamente por Desmond et al. (2014). Neste estudo diferentes formas de geometria foram simuladas para investigar dentre outros aspectos, o efeito da heterogeneidade do dossel e a introdução da distribuição vertical do LAD da vegetação no escoamento do vento. O efeito do dossel de uma floresta foi simulado em CFD usando diferentes níveis de detalhamento morfológico a fim de obter a melhor forma de inserção dos dados na avaliação da morfologia do dossel da vegetação em simulações numéricas. Os resultados mostraram que a introdução do maior detalhamento da geometria e a adição da distribuição do LAD com altura apresentou melhoria na correlação entre os resultados da simulação e os dados em túnel de vento. No entanto, o impacto da introdução desses parâmetros na redução da velocidade do vento na esteira não foi analisado quantitativamente de forma detalhada. No trabalho os resultados mostram apenas uma correlação entre os dados medidos e simulados.

Desmond , Watson e Hancock (2017) avaliaram em CFD o escoamento em floresta utilizando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST incluindo os efeitos da estabilidade atmosférica. A magnitude da velocidade e a energia cinética turbulenta foram avaliados para estabilidade neutra e estável. Os resultados mostraram que o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST apresentou boa concordância com os resultados experimentais, principalmente nos pontos acima da altura da copa das árvores. No entanto, na região de esteira da

vegetação abaixo da copa das árvores para a condição de estabilidade neutra, o modelo não forneceu boa concordância, a velocidade foi subestimada pelo modelo, principalmente na região de esteira próxima. No entanto, os resultados apresentaram maior concordância a medida que o escoamento se desenvolveu a jusante da vegetação. Para a energia cinética turbulenta, o modelo obteve boa concordância na região abaixo da altura da copa das árvores e em uma pequena faixa logo acima da vegetação. Nas regiões superiores, no entanto, a energia cinética turbulenta não foi predita corretamente, esta foi superestimada pelo modelo. Além disso, o modelo mostrou interferência no escoamento até 40 H a jusante da barreira, enquanto o experimental o alcance foi de 30H.

Estudo recente avaliou o comportamento do escoamento na vegetação utilizando apenas termos fonte de *momentum* descrito pelo coeficiente de resistência inercial (LIU et al., 2018). O estudo investigou em CFD o comportamento do escoamento ao redor de uma única e múltiplas plantas para diferentes morfologias e coeficientes de resistência. O modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável foi empregado na simulação mostrando boa previsão do campo de escoamento para uma única, como múltiplas plantas. Dentre os resultados, observou-se que a morfologia e o coeficiente de resistência de uma única planta influenciaram significativamente o comportamento do escoamento. O aumento da densidade da área plantada proporcionou um melhor efeito de proteção na região a jusante da barreira, no entanto, a eficiência das plantas individualmente foi menor quando aumentou o número de plantas.

### 3.3 ESTUDOS DE APLICAÇÃO DA IMPLANTAÇÃO DE BARREIRA DE VENTO NA ATENUAÇÃO DA VELOCIDADE INCIDENTE EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM DE MATERIAIS GRANULADOS

Como já estabelecido anteriormente, a utilização de barreiras de vento ao redor de pátios industriais constitui um importante método de controle de erosão e emissões fugitivas em pilhas, uma vez que reduz a velocidade do vento, contribuindo na proteção da erosão eólica (SANTIAGO et al., 2007; FERREIRA; LAMBERT, 2011; SAN; WANG; QIU, 2018). Diversos estudos têm avaliado a capacidade das barreiras de vento em reduzir a velocidade do escoamento a fim de controlar a emissão difusas de pilhas e pátios de estocagem (CONG et al., 2011, 2013; LEE; PARK, 1998; LEE; PARK, 2000; LEE;

PARK; PARK, 2002; STUNDER; ARYA, 1988). No Quadro 2 são destacados os principais trabalhos encontrados na literatura levantada. Estudos estes que avaliaram os efeitos no escoamento e na emissão de materiais particulados da implantação de barreiras artificiais ao redor de pátios e pilhas de estocagem.

Quadro 2: Estudos que avaliaram os efeitos da implantação de barreiras de vento artificiais no escoamento em pilhas e pátios de estocagem

| Trabalhos com barreiras artificiais   | Autores                 |
|---|-------------------------|
| Escoamento modificado por barreira de vento artificial em pilhas e pátios de estocagem de materiais | Borges e Viegas (1988)  |
|   | Lee e Park (2000)       |
|   | Lee e Lim (2001)        |
|   | Park e Lee (2002)       |
|   | Yeh, Tsai e Yang (2010) |
|   | Cong et al. (2011)      |
|   | Cong et al. (2013)      |
|   | Song et al. (2014)      |
|   | Novak et al. (2015)     |
|   | San, Zhao e Qiu (2019)  |

Borges e Viegas (1988) realizaram um dos trabalhos iniciais que avaliaram a utilização de barreira de vento no controle de emissão em pilhas de estocagem em pátios abertos. Os autores investigaram experimentalmente em túnel de vento diferentes tipos de barreira de vento artificial (sólidas e porosas) com variadas dimensões (altura e comprimento), porosidades e distâncias de posicionamento a jusante da pilha. O estudo foi realizado a partir da avaliação do comportamento do escoamento ao redor de uma pilha isolada modificado pela presença de barreira de vento, e os resultados foram comparados com um modelo completo com 5 pilhas dispostas de forma paralelas. Os resultados comprovaram a eficiência na redução da velocidade máxima do vento para todos os tipos de barreiras testadas, destacando uma redução de 20 a 30% para as áreas que apresentaram maior velocidade na ausência do equipamento. Quanto à direção do escoamento, os resultados mostraram que o comprimento e a localização da barreira de vento são importantíssimos para a eficácia de proteção da região de abrigo quando o vento incidente não é normal à barreira. Estudos mostram uma redução do efeito de abrigo para ventos

na direção oblíqua quando comparados a vento incidentes perpendiculares a barreira (CONG et al., 2011; YEH; TSAI; YANG, 2010).

Lee e Kim (1998) investigaram o escoamento ao redor de um modelo de prisma triangular posicionado a jusante de um atenuante da velocidade do tipo artificial (barreira porosa) em estudo experimental em túnel de água. Uma barreira com porosidade de 38,5% foi colocada a 1H (H corresponde à altura da barreira) a montante do prisma para protegê-lo. O comportamento do escoamento na região de esteira da barreira foi avaliado a partir das medições e análises de intensidade da turbulência, energia cinética turbulenta e velocidade média do escoamento. As medições foram realizadas usando a técnica de Velocimetria por Rastreamento de Partículas (do inglês Particle Tracking Velocity - PTV). Baseado no campo de vetores de velocidade calculados, observou-se que a instalação da barreira reduziu de forma significativa o nível das flutuações de velocidades, sendo essas associadas ao desprendimento de vórtices de grandes escalas no topo da pilha no lado jusante. Além disso, a barreira apresentou expressiva redução de velocidade nas regiões abaixo de sua altura, enquanto que a separação do escoamento que ocorreu no topo da barreira provocou a formação de uma camada de cisalhamento turbulenta com a presença de altas flutuações de velocidade. Quanto à energia cinética turbulenta, a presença da barreira porosa aumentou os níveis de ECT nas camadas acima do topo da barreira, enquanto abaixo os valores de energia cinética turbulenta foram menores em relação aos dados medidos na ausência da barreira porosa. Assim, verificou-se uma significativa redução de ECT em diferentes regiões na superfície do prisma, destaque para região superior do prisma onde a redução foi de 1/3. Dessa forma, os autores indicam que a instalação de uma barreira porosa não só reduz a velocidade média, mas também suprime as flutuações de velocidade na parte inferior da região de esteira. Concluiu-se, que utilização de barreira porosa é efetiva na redução da erosão eólica, uma vez que proporcionou redução de velocidade e da transferência de quantidade de movimento ao redor da superfície do prisma.

Lee e Park (2000) estudaram experimentalmente em túnel de vento o efeito de abrigo de uma barreira com 40% de porosidade localizada a 2,1 H das pilhas de estocagem com altura de 1H (H é a altura da barreira), além do caso da ausência da estrutura. Quatro direções do vento foram analisadas e foram realizadas medições dos campos de pressão e tensão de cisalhamento. Os resultados mostraram que para maior eficiência no efeito de

abrigo nas direções avaliadas, a barreira deve ser instalada ao longo de todos os lados periféricos do pátio de estocagem. Além disso, uma barreira central adicional deve ser instalada no pátio de estocagem a cada cinco pilhas de carvão consecutivas a fim de evitar o recolamento do escoamento sobre as pilhas e o consequente aumento da emissão de partículas.

Park e Lee (2002) investigaram em túnel de vento a redução da velocidade e o efeito de abrigo proporcionado por uma barreira de vento ao ser introduzida ao redor de um pátio aberto de estocagem de pilhas de carvão. Uma barreira porosa com altura similar a altura das pilhas com 30% de porosidade foi instalada ao longo das fronteiras leste e norte do pátio (Figura 7). O efeito de proteção causada pela barreira foi avaliado medindo os valores de pressão e tensão de cisalhamento na superfície das pilhas. A partir dos resultados obtidos experimentalmente, uma barreira de vento em escala real foi construída e implantada no pátio de estocagem de POSCO Kwang-Yang, fábrica localizada no litoral Sul da península coreana. Medições de velocidade local e concentração de partículas suspensas foram realizadas a fim de validar os resultados de túnel de vento e verificar o comportamento da barreira de vento quanto a sua eficácia em reduzir os níveis de velocidade e a emissão fugitiva nos pátios. A instalação da barreira porosa em torno do Pátio 5 (Figura 7) diminuiu em média metade do valor da velocidade média do vento dentro do pátio de armazenamento em comparação com os dados da série histórica de 10 anos sem a barreira. Destaque para a região da crista das pilhas onde a redução variou de 28% a 70%, local onde normalmente estão os pontos de maior velocidade e consequentemente mais susceptíveis a erosão eólica. A distribuição média da velocidade do vento medida ao longo das linhas perpendiculares do pátio, de forma geral mostraram que a velocidade do vento dentro do pátio de armazenamento foi reduzida devido à instalação da barreira de vento colocada ao longo dos lados leste e oeste do pátio. As medições instantâneas de velocidade permitiram o cálculo da intensidade da turbulência para as regiões a montante e a jusante da barreira. Os resultados mostraram que ao passar pela barreira porosa, as flutuações de velocidade foram significativamente reduzidas e velocidades próximas de zero foram medidas com frequência na região a jusante da barreira. As medições da velocidade média e intensidade da turbulência foram reduzidas de 1,52 m/s e 10,5% para 0,26 m/s e 5,3% a jusante da barreira. No entanto, ao avançar em direção ao centro do pátio de armazenamento, a velocidade voltou a aumentar. Isso

ocorre porque o efeito de abrigo diminui à medida que o vento se afasta da barreira. Visto a redução da velocidade e intensidade da turbulência obtida com a instalação da barreira de vento, conclui-se que a barreira porosa diminuiu efetivamente a velocidade do vento incidente e produziu um bom efeito de proteção na região a jusante da barreira. Finalmente, uma redução de 70% a 80% na medição de partículas suspensas totais foi encontrada baseada na medição da concentração de partículas totais em suspensão (PTS) dentro do pátio de estocagem.

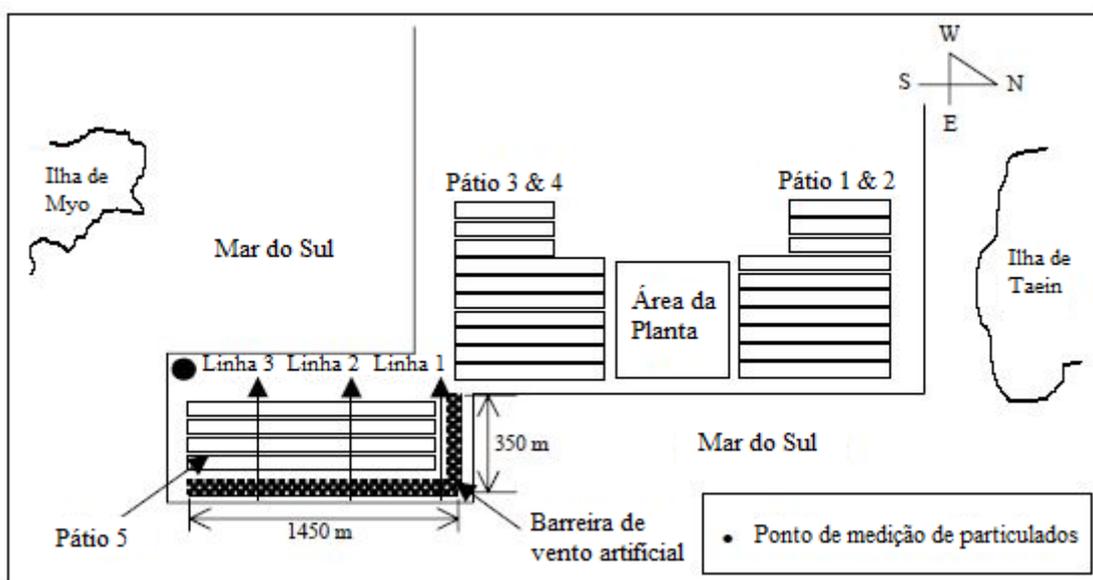


Figura 7: Esquema representativo da Fábrica POSCO Kwang-Yang, vista superior de sua localização e arranjo do site industrial. Adaptado de Park e Lee (2002)

Yeh, Tsai e Yang (2010) realizaram estudo experimental e numérico sobre barreiras de vento e sua interação com o escoamento sobre pilhas. O estudo foi dividido em duas partes: (1) análise do escoamento sobre pilha na presença de barreira de vento para identificação do equipamento mais eficiente na redução da erosão (barreira sólida ou porosa com 30% de porosidade); (2) avaliação de configurações na instalação de barreira porosa para redução da erosão eólica em um modelo de escala real de um pátio industrial sobre diferentes direções de vento incidente. Os resultados experimentais mostraram que as estruturas do escoamento são significativamente modificadas pela presença da barreira de vento, como também houve um aumento na velocidade limite (velocidade do vento em que as partículas de areia começaram a se mover da superfície da pilha). De forma geral, a introdução da barreira de vento aumentou a velocidade crítica da emissão de

partículas (velocidade limite), sendo que na barreira porosa esse aumento foi mais expressivo, passando de 2,7 m/s para quase 7,1 m/s. Isso significa que inicialmente a emissão começava a ser observada para velocidade do escoamento livre de 2,7 m/s, enquanto que a partir da instalação da barreira porosa a emissão passou a ser observada para a velocidades maiores, próximas de 7,1 m/s. Quanto aos resultados numéricos, no geral, a barreira de vento alterou o potencial de erosão em várias regiões sobre a pilha, principalmente na região do topo onde foi observada uma importante redução no potencial de erosão. Para barreiras sólidas, observou-se que a maior emissão de partículas ocorreu, principalmente, na face incidente da pilha devido à formação de um vórtice entre a barreira de vento e a pilha.

Na segunda parte do estudo, foram avaliados diferentes cenários do posicionamento das barreiras de vento no pátio de estocagem aberto sobre diferentes direções do vento incidente, com objetivo de identificar a configuração com maior eficiência na redução do potencial de erosão. Para os cenários com diferentes direções de vento incidente, foi demonstrado que a eficiência de controle de poeira de estruturas de barreira porosas é significativamente dependente da direção do vento incidente. Os resultados da simulação revelaram que a configuração tradicional de barreira de vento retangular protege as pilhas dos efeitos erosivos do vento incidente com um ângulo normal, mas tem uma eficiência de controle extremamente fraca para o vento incidente com um ângulo de 45°. Segundo os autores, esse comportamento é devido a formação de um vórtice no canto entre as faces da barreira de vento que recola sobre as pilhas aumentando a velocidade e como consequência a emissão. A barreira octogonal, entretanto, é mais eficaz do que a barreira retangular convencional para proteger as pilhas do vento incidente obliquamente, porém, seu desempenho é notavelmente pior do que da barreira retangular para vento incidente normalmente. Quanto à porosidade, os resultados mostraram que a porosidade de  $\beta = 30\%$  produziu uma redução efetiva do potencial de erosão eólica na superfície das pilhas de carvão em um pátio de armazenamento aberto.

Cong et al. (2011) estudaram a eficiência do uso de barreiras do tipo artificial, na emissão de partículas em um pátio de estocagem. Os autores investigaram a melhor distribuição espacial das barreiras de vento na área industrial, de forma a conciliar a máxima eficiência ao menor custo. Para isso, o escoamento e a distribuição da velocidade na superfície das pilhas foram obtidos por simulação numérica utilizando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG

para diferentes cenários de posicionamento das barreiras. A validação da simulação foi realizada comparando os resultados do coeficiente adimensional de redução da velocidade estimados com aqueles medidos em campo. Os resultados mostraram que a redução da velocidade proporcionada pelas barreiras na simulação numérica e nas campanhas em campo seguiram a mesma tendência, porém com uma diferença de 7,8% entre elas. Além disso, o efeito de abrigo da barreira porosa foi constatado nas campanhas em campo. Outro ponto importante observado no estudo foi que o coeficiente adimensional de redução da velocidade mostrou atenuação do vento em todos os pontos medidos, exceto em dois locais. Os resultados do CFD mostraram que a introdução da barreira de vento foi capaz de reduzir a velocidade do vento incidente na superfície das pilhas no pátio de estocagem e conseqüentemente houve uma diminuição das emissões, pois a intensidade do escoamento está relacionado ao processo de erosão e emissão de partículas em pilhas de estocagem.

Cong et al. (2013) estudaram a eficácia do abrigo da barreira de vento com porosidade de 40% em um pátio de carvão em escala real. As barreiras foram instaladas ao longo dos limites leste e sul do Pátio 1 (Figura 8) com altura de 23 m, superior à altura média das pilhas de carvão (17 m). Duas campanhas de medição em campo foram realizadas, sendo uma para medição da velocidade do vento e outra para avaliar a concentração de partículas no pátio. Para avaliação da velocidade média, 16 pontos foram medidos dentro do pátio de forma a cobri-lo por completo e um outro ponto foi medido fora do pátio para referência. O ponto de referência foi posicionado a uma distância suficiente das barreiras para que o vento incidente seja livre sem perturbações. As medições da velocidade do vento em todos os pontos foram realizadas por um anemômetro portátil preso a um guindaste fixado a altura máxima de 10 m do solo. Os 16 pontos de medição foram monitorados repetidamente na altura vertical de 4, 6 e 8 m do solo. O efeito de abrigo produzido pelas barreiras foi avaliado baseado na redução de velocidade média do escoamento e no tempo médio de redução do perfil de velocidade obtido ao longo da direção horizontal e longitudinal no pátio. A velocidade horizontal medida forneceu o alcance da atuação da barreira na redução da velocidade do vento. A concentração na região do pátio de estocagem foi medida para avaliar a emissão do particulado dentro da região de influência da barreira porosa. Para a medição da concentração, seis pontos de amostragem foram organizados, sendo 3 localizados dentro do pátio e 3 fora dele (ver

Figura 8). Dentre eles, um ponto de medição de referência escolhido que se encontra próximo da área residencial. A determinação da concentração de partículas foi realizada utilizando amostradores de Partículas Suspensas Totais de volume médio (modelo TH-150). Os resultados da medição da velocidade mostraram grande flutuação no escoamento incidente quando comparadas àquelas medidas a jusante da barreira. Foi observado que a barreira reduziu os valores da intensidade da turbulência em aproximadamente 50% e uma redução ainda maior foi observada na velocidade média do vento. Para a avaliação do impacto das barreiras de vento na redução de emissões foram realizadas medições de concentração antes e após a implantação das barreiras. As medições realizadas anteriormente à instalação das barreiras encontraram valores elevados de concentração de material particulado nos pontos de referência, fato não observado após a instalação das barreiras. Após sua implantação os valores de concentração dentro do pátio foram maiores que os medidos nos pontos de referência. Segundo os autores, esse fato pode ser explicado pela redução da velocidade causada pela barreira de vento que resulta na diminuição da capacidade de transporte do vento de partículas fazendo com que essas partículas fiquem retidas dentro dos limites do pátio.

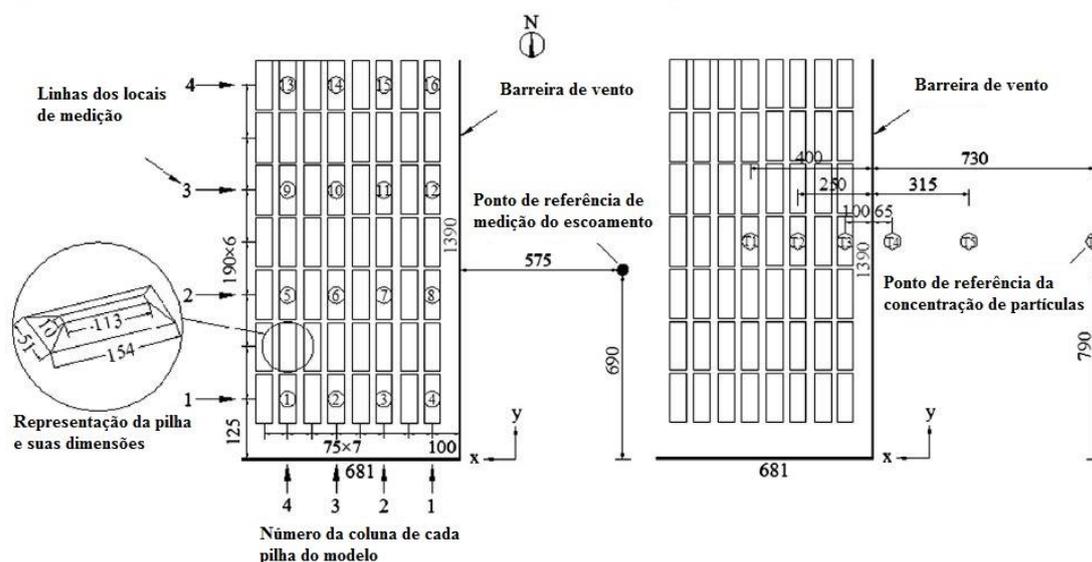


Figura 8: Esquema representativo do pátio de estocagem de carvão do Porto de Qinhuangdao, vista superior do arranjo das pilhas com o posicionamento da barreira de vento e localização dos pontos de medição das campanhas de campo. Adaptado de Cong et al. (2013).

Song et al. (2014) estudaram a área a montante e jusante de uma barreira porosa com o objetivo de relacionar o efeito de abrigo gerado pela barreira e a distribuição das tensões

de cisalhamento na superfície da pilha. O escoamento foi simulado numericamente usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  padrão. O comportamento do escoamento ao redor da pilha foi avaliado considerando a presença de barreiras de vento a montante da pilha com diferentes porosidades ( $\beta = 0$  a 60%). Os resultados apontaram que a instalação de uma barreira porosa impacta a estrutura aerodinâmica do escoamento circunvizinho da pilha. As características da turbulência ao redor da barreira com porosidade baixa (0 e 20%) foram significativamente diferentes daquelas com maior porosidade, como 30% a 60%. Porosidades maiores (30% a 60%) reduziram a velocidade e a tensão de cisalhamento do vento que incide sobre a superfície da pilha. Ao passo que as barreiras com porosidades 0 e 20% alteraram as características do escoamento ao redor da pilha. Para porosidade de 0% e 20%, um vórtice se formou do lado de montante da pilha com centro localizado em dois terços da altura da pilha, onde foram encontrados os maiores valores de velocidade e tensão de cisalhamento. No geral, a introdução da barreira de vento a 1H montante da pilha reduziu a velocidade e tensão de cisalhamento na superfície da pilha. Para os casos investigados, a porosidade ideal encontrada deve estar entre 20 e 30%, intervalo inferior ou superior da qual as características da força de cisalhamento diferem fortemente na superfície da face incidente da pilha. Verificou-se também que porosidades de 0 ou 60% não reduziram significativamente as emissões. Assim, uma relação entre a porosidade e os resultados da velocidade e tensão de cisalhamento no comportamento do escoamento foi observada, pois o aumento da porosidade causou um aumento gradativo da velocidade e tensão de cisalhamento em várias regiões na superfície da pilha. Isso alterou a distribuição das forças que atuam sobre a pilha e modificaram a distribuição do potencial de erosão na superfície dessa. Dessa forma, conclui-se que a barreira porosa posicionada a montante foi capaz de reduzir a erosão eólica na pilha, no entanto, a depender da porosidade da barreira o comportamento do escoamento que se desenvolve ao redor da pilha pode ser significativamente alterado, modificando assim erosão na superfície da pilha.

San, Zhao e Qiu (2019) analisaram numericamente a otimização do *design* de uma barreira artificial utilizada para o controle de erosão eólica em pilhas de estocagem. O estudo avaliou a velocidade, energia cinética turbulenta e a distribuição média de pressão na superfície do modelo prismático. Os autores calcularam a distribuição de pressão de acordo com o coeficiente de pressão média expresso como  $C_p = \Delta p / (0,5\rho U_h^2)$ , sendo  $\Delta p$

a diferença de pressão média entre a pressão superficial e uma pressão de referência, e  $0,5\rho U_h^2$  a pressão dinâmica média na altura do modelo de pilha. Foi avaliado, ainda, o valor absoluto do coeficiente médio de pressão, sendo desejável baixos valores de  $C_p$ , uma vez que elevadas pressões positivas ou negativas na superfície de pilhas podem causar deslocamento de partículas e difusão de pilhas de materiais. O modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG foi utilizado na predição do escoamento e os resultados foram validados por estudo experimental encontrado na literatura. A determinação da porosidade ideal considerou a minimização de três parâmetros: (1) a soma dos valores absolutos do coeficiente de pressão na superfície da pilha; (2) a energia cinética turbulenta total ao redor da pilha, e (3) o valor total da razão do pico de velocidade que envolve a velocidade média e a turbulência. Os resultados apontaram que a pressão média e o comportamento do escoamento ao redor da pilha são significativamente afetados pela altura e porosidade da barreira. Com relação à altura da barreira,  $0,5h_p - 1,0h_p$  ( $h_p$  é a altura da pilha) mostraram maior eficácia na redução do valor absoluto do coeficiente de pressão médio na superfície do prisma. Verificou-se ainda que a barreira de vento com altura  $0,5h_p$  e porosidade  $\beta = 22,9\%$  mostrou-se eficaz para diminuir a pressão superficial e a velocidade média ao redor do prisma, no entanto não houve redução satisfatória da energia cinética turbulenta perto da crista da pilha devido a influência do escoamento cisalhante na separação do escoamento no topo da pilha. Enquanto que a barreira com  $1,0h_p$  de altura e porosidade  $\beta = 10,3\%$  foi capaz em equilibrar satisfatoriamente os efeitos da velocidade média e energia cinética da turbulenta. No entanto, pressões negativas significativas ( $C_p = -0,6$ ) na superfície de montante da pilha foram observadas, fato que deve ser considerado na determinação da porosidade ideal para controle da erosão em pilhas já que pressões negativas elevadas estão relacionadas ao aumento da capacidade de suspensão de partículas.

A partir dos estudos apresentados nas Seções 3.1, 3.2 e 3.3, observa-se que são encontrados na literatura um grande número de trabalhos que investigaram os efeitos da implantação de diferentes tipos de barreiras de vento no campo de velocidade e turbulência em um escoamento, bem como a eficiência desses instrumentos na redução da velocidade, proteção de áreas e controle da erosão eólica de materiais granulados. Todavia, há ainda a necessidade de maior investigação dos efeitos desses instrumentos na redução da velocidade e controle da erosão pela avaliação dos parâmetros específicos

destas barreiras que influenciam e modificam o escoamento. Outro importante ponto observado nos trabalhos de literatura foi a boa capacidade de predição do escoamento em estudos de barreira de vento com o uso de modelagem numérica em CFD. Esta ferramenta proporciona boa previsão, baixo tempo de resposta e a capacidade de avaliação de um vasto número de cenários.

No entanto, fatores relacionados com a modelagem em CFD desses elementos de controle necessitam de maior investigação para determinação de boas práticas e orientações para sua modelagem, principalmente àqueles relacionados às barreiras naturais. Aspectos fundamentais da modelagem numérica e do efeito físico das barreiras no escoamento, que não foram amplamente investigados em outros trabalhos e necessitam assim de maior compreensão de seus efeitos na modelagem e no resultado final da simulação do escoamento atmosférico turbulento, serão discutidos no presente trabalho: similaridade entre estudos numéricos e experimentais, sensibilidade à discretização do domínio computacional, comparação detalhada de modelos de turbulência e investigação dos efeitos das barreiras na distribuição de turbulência e cisalhamento nas superfícies a jusante das barreiras.

Adicionalmente, é reduzido o número de trabalhos que investigaram a influência da utilização do maior detalhamento das características morfológicas da vegetação na modelagem numérica e seus efeitos no campo de velocidade e turbulência. Acrescenta-se a isso, que o dossel da vegetação é o principal parâmetro na modelagem dos efeitos de atenuação do vento no campo de escoamento e conhecendo previamente sua interferência no campo de turbulência, faz-se necessário maior investigação da influência da modelagem do dossel da vegetação na redução da velocidade a partir da introdução dos parâmetros morfológicos característicos da vegetação.

## 4 METODOLOGIA

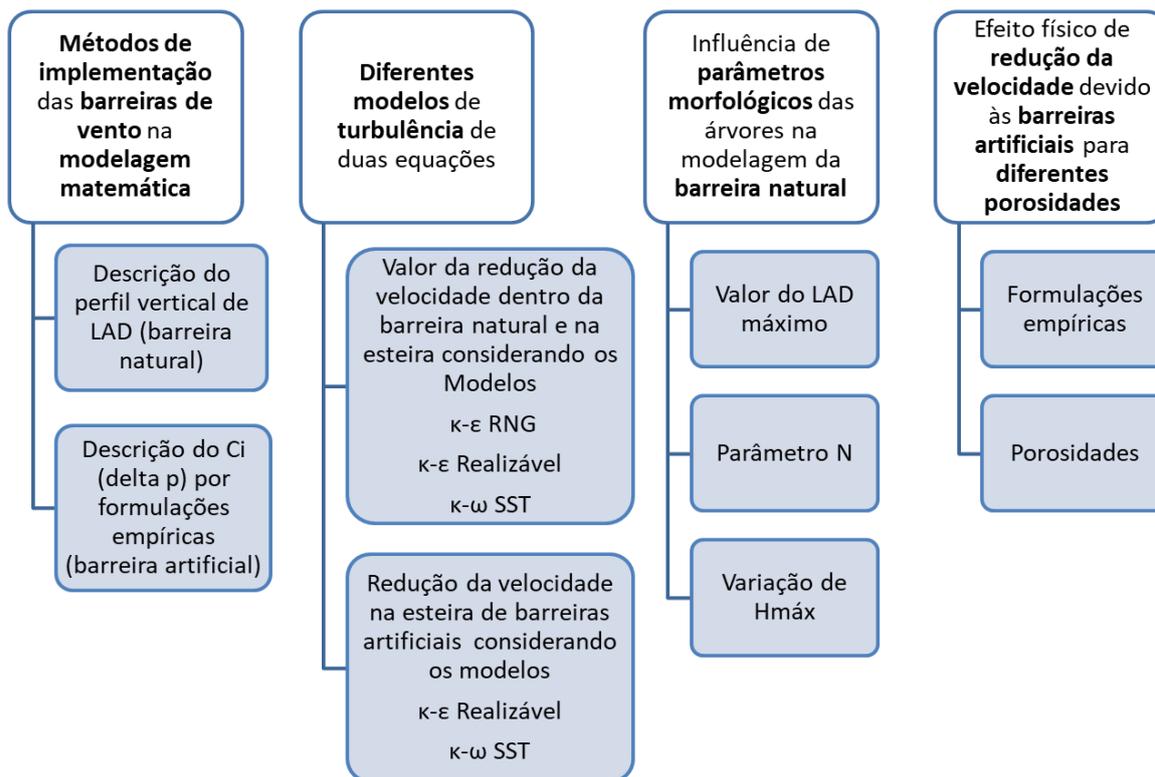
A metodologia foi dividida em três partes. Na primeira parte é apresentada a descrição dos cenários investigados, o domínio computacional, a representação do fenômeno físico e os principais parâmetros utilizados na descrição do fenômeno modelado. Na segunda parte, são apresentadas as equações governantes, as hipóteses simplificadoras, os modelos de turbulência que serão avaliados e as condições de contorno. Finalmente, na terceira parte, é indicado o método de solução numérica das equações governantes.

### 4.1 CENÁRIOS INVESTIGADOS: BARREIRA DE VENTO VEGETAL E ARTIFICIAL

Os cenários a serem investigados no presente estudo, foram selecionados a fim de permitir a análise de barreiras de vento do tipo porosa natural e artificial. Além disso, esses cenários foram selecionados com base em trabalhos experimentais em túnel de vento reportados por Dong et al. (2007, 2010) e Miri, Dragovich e Dong (2017) para a validação da simulação do escoamento dos cenários estudados.

Para isso, foram construídos e avaliados os seguintes cenários:

- Barreira porosa vegetal: avaliação de diferentes métodos de implementação na modelagem matemática do escoamento turbulento e análise da influência dos parâmetros morfológicos da vegetação no campo de velocidade para avaliação da redução da velocidade do escoamento médio e formação da região de abrigo a jusante da barreira de vento, considerando diferentes modelos de turbulência e sua capacidade em prever o escoamento turbulento modificado pela barreira.
- Barreira porosa artificial: avaliação de diferentes métodos de implementação na modelagem matemática do escoamento turbulento, considerando a capacidade de diferentes modelos de turbulência na predição do escoamento para estudo do efeito físico de redução da velocidade no escoamento médio devido às barreiras artificiais sólidas e artificiais porosas de diferentes porosidades.



#### 4.1.1 escoamento em barreiras naturais

##### 4.1.1.1 Detalhes do experimento conduzido por Miri, Dragovich e Dong (2017)

Nesse item são apresentados os detalhes do experimento em túnel de vento realizado por Miri, Dragovich e Dong (2017) a ser modelado numericamente no presente trabalho.

No estudo experimental, plantas naturais foram introduzidas em túnel de vento e a velocidade do escoamento medida ao longo da extensão da área coberta pela vegetação. Plantas de diferentes espécies com aproximadamente 0,15 metros de altura ( $H$ ) foram colocadas perpendicularmente à direção de entrada do túnel de vento, distribuídas em fileiras espaçadas. Diferentes distribuições espaciais foram estudadas de forma a representar variações na densidade de área plantada conforme mostrado na Figura 9.

Miri, Dragovich e Dong (2017), dentre outras análises, avaliaram a redução da velocidade do vento de acordo com as características morfológicas das plantas. Para isso, os autores mediram a velocidade média do escoamento do vento para duas espécies de plantas (*C. bipinnapus* e *L. lucidum*) com configurações morfológicas distintas. A Figura 10 apresenta as duas espécies de plantas (*C. bipinnapus* e *L. lucidum*) utilizadas pelos autores

no experimento em túnel de vento. Além disso, a Figura 10(c) mostra um exemplo de gráfico da distribuição vertical do LAD empregadas nas simulações numéricas realizadas no presente estudo.



Figura 9: Estudo em túnel de vento com a utilização de plantas naturais, tubo de Pitot posicionados ao longo da linha central e diferentes densidades de cobertura vegetal (Adaptado de Miri, Dragovich e Dong, 2017).

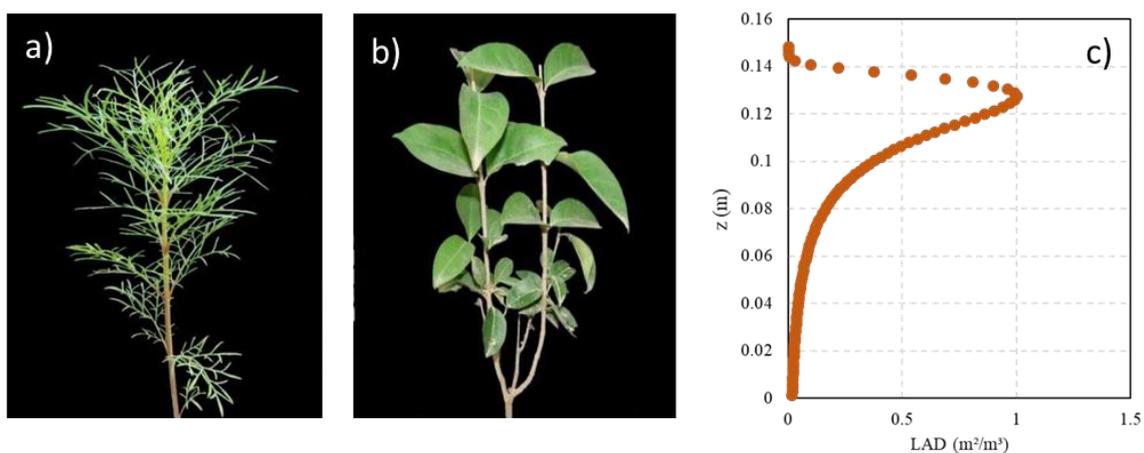


Figura 10: Espécie *C. bipinnapus* (a) e *L. lucidum* (b) utilizadas Miri, Dragovich e Dong (2017) em experimento de túnel de vento e gráfico do perfil vertical de LAD usado na simulação numérica do presente estudo. Adaptado de Miri, Dragovich e Dong (2017).

A Figura 11 apresenta a representação esquemática do túnel de vento contendo a distribuição das fileiras da vegetação no meio poroso e a localização dos pontos de medição no interior do túnel. O domínio de interesse tem 7,0 m de comprimento, 0,5 m de largura e 0,6 m de altura (Figura 11(a)). A vegetação está localizada em  $x=0$ , sendo que as fronteiras de entrada e saída do domínio estão a aproximadamente  $20H$  a montante e  $40H$  a jusante da barreira, respectivamente. Na região coberta pela vegetação, as árvores são representadas de forma individual, distribuídas de forma espaçadas como apresentado

na Figura 11(b). A altura e as dimensões laterais (comprimento e largura) da vegetação são de 0,15m e 0,1m, respectivamente, como pode ser vista nas Figura 11(a) e Figura 11(b). Na Figura 11(c) é mostrado o domínio vegetal com baixa densidade, onde é possível observar a distância lateral entre as plantas e uma vista tridimensional da região do domínio computacional separada para representação de vegetação. A Figura 11(d) mostra os pontos onde foram medidos os perfis de velocidade para determinação da variação do escoamento médio. A redução da velocidade foi determinada com base na medição em pontos a montante e jusante da barreira, um total de 8 pontos localizados na linha central do túnel de vento. As medições de velocidade foram realizadas por tubos de Pitot. Estes foram distribuídos em 8 (oito) diferentes pontos ao longo da linha central do túnel de vento, cuja localização é expressa em relação a posição inicial da vegetação: -0,100; -0,075; -0,030; 0; 0,100; 0,180; 0,230; 0,275 m. Ao longo da altura, foram medidos os seguintes pontos para composição do perfil vertical: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,15; 0,17; 0,19; 0,21; 0,23; 0,25; 0,27; 0,29; 0,30; 0,32; 0,34; 0,36; 0,38; 0,40; 0,42 e 0,44 m.

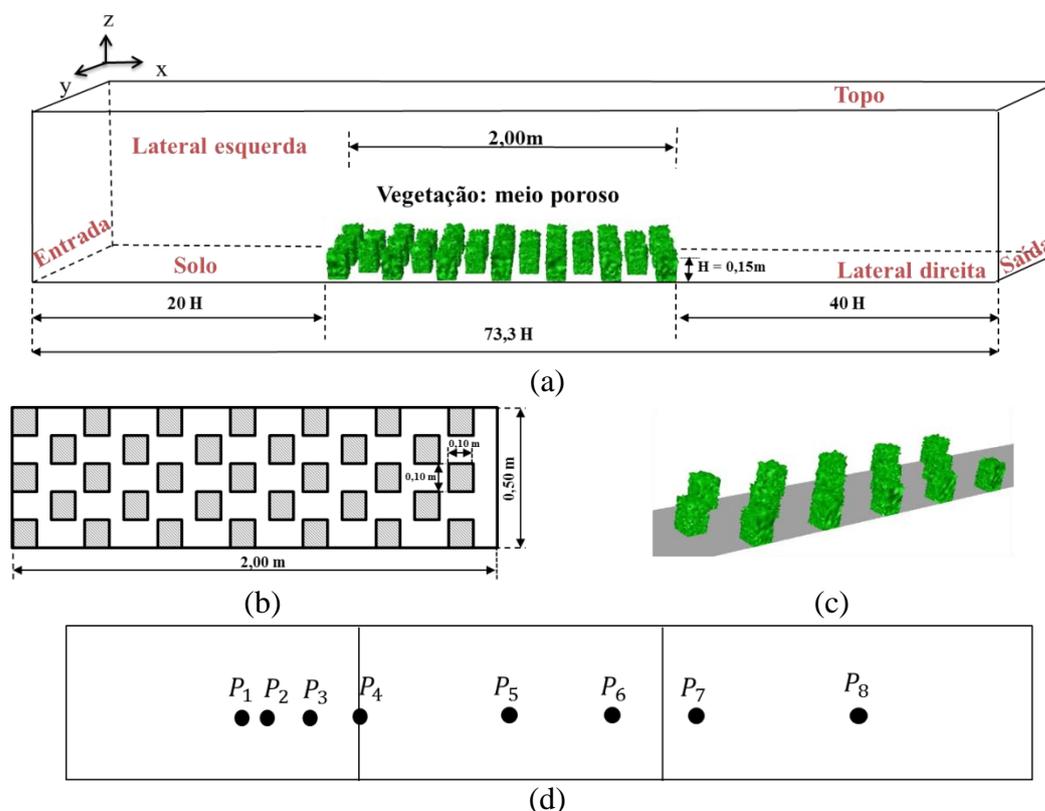


Figura 11: (a) Representação esquemática da seção de teste do túnel de vento nos experimentos conduzidos por Miri, Dragovich e Dong (2017) com barreira vegetal; (b) distribuição das plantas de acordo com seu arranjo; (c) vista em perspectiva da vegetação representada e; (d) distribuição pontos de obtenção dos dados de acordo com o experimento em túnel de vento.

A Figura 12 apresenta a vista superior do domínio computacional das barreiras de vento de acordo com a configuração dos arranjos e espaçamentos entre as plantas para as respectivas distribuições espaciais horizontais: (a) baixa , (b) média e (c) alta, equivalente ao espaçamento de  $2,00H$ ,  $1,33H$  e  $0,70H$ .

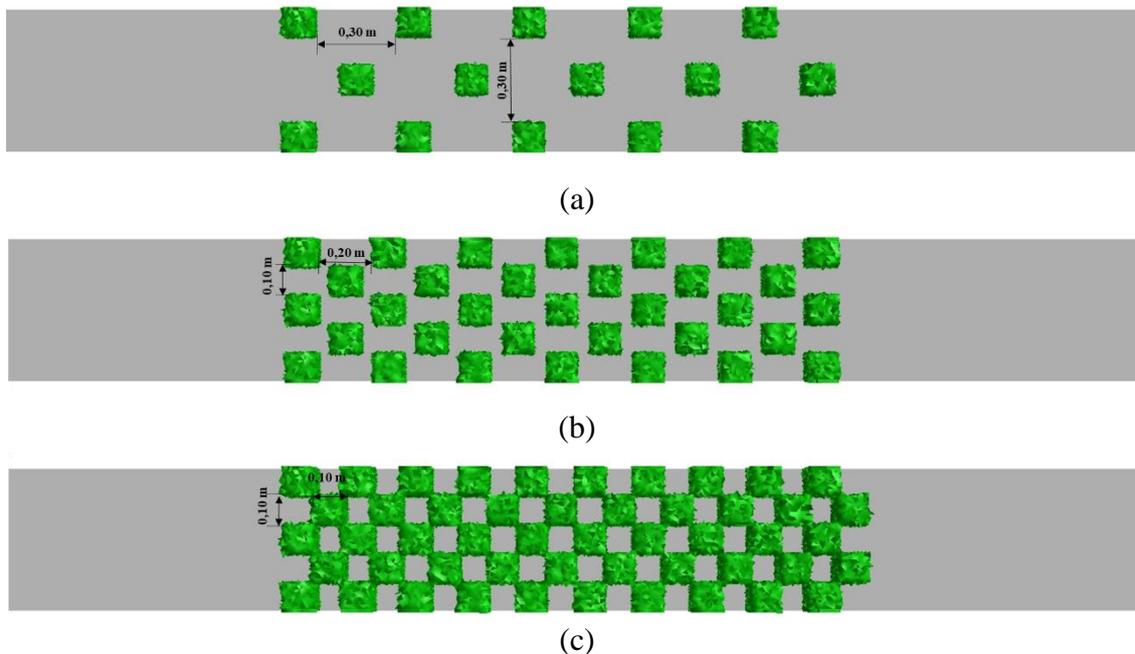


Figura 12: Vista superior da barreira vegetal de acordo com a distribuição das plantas, espaçamento e arranjo das densidades baixa (a), média (b) e alta(c), respectivamente.

Miri, Dragovich e Dong (2017) apresentam resultados experimentais da distribuição do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  (CORNELIS; GABRIELS, 2005) para diferentes distribuições espaciais horizontais (densidades) e características morfológicas da vegetação (distribuição vertical do coeficiente de resistência inercial  $C_i = LAD * C_D$ ). Esses perfis verticais e horizontais obtidos para diferentes distribuições espaciais da barreira permitirão analisar como a velocidade do vento é afetada pela vegetação.

#### 4.1.1.2 Representação física e matemática da barreira natural

As barreiras vegetais causam resistência ao escoamento do vento, agindo como sumidouro de quantidade de movimento e proporcionando a redução da velocidade do vento. Diferente da barreira de vento bidimensional, a porosidade não é suficiente para descrever o comportamento de resistência causado pela vegetação. O escoamento do ar

na área coberta pela vegetação é muito diferente na região entre as plantas e no interior das copas. A pressão estática na face incidente da árvore aumenta e a velocidade diminui, enquanto o escoamento entre as árvores é direcionado para o centro do dossel, gerando a canalização do escoamento, resultando no aumento da velocidade nessa região (LIU et al., 2018). Além disso, a barreira vegetal é uma estrutura tridimensional com singularidades importantes em relação a barreira de vento bidimensional artificial, como a *windfence*.

Simular na íntegra os detalhes das estruturas complexas internas de plantas, como ramos e folhas, elevam a necessidade de resolução da malha e das condições de contorno aplicadas, o que pode impossibilitar a resolução dos casos devido à limitação da capacidade computacional. No entanto, para estudar o efeito de abrigo de uma árvore individual e/ou de uma barreira vegetal, diferentes abordagens estão disponíveis onde a simulação com o detalhamento das estruturas internas da vegetação não é necessário.

Dentre as abordagens encontradas na literatura para modelar a vegetação e os efeitos gerados no escoamento devido à sua presença, destaca-se a abordagem explícita que apresenta bons resultados quando comparados com dados experimentais em túnel de vento. Zeng et al. (2020) utilizaram a abordagem explícita na modelagem para avaliar o comportamento do escoamento em árvores no seu estudo em escala real de microclima em área urbana. Os resultados mostraram boa predição do escoamento na esteira da árvore, especialmente o perfil médio de velocidade. Dessa forma, baseado nos resultados satisfatórios encontrados em diversos trabalhos publicados, as características aerodinâmicas e o efeito de abrigo proporcionado pela barreira vegetal serão modelados por abordagem explícita.

Na abordagem explícita, a geometria da vegetação não é resolvida exatamente na sua forma individualizada com todas as estruturas internas, ocorre que o efeito da resistência do vento é parametrizado por termos locais de sumidouros tridimensionais adicionados à equação de momentum, descrito pela equação (8) apresentada na seção 3.2, e reapresentada a seguir:

$$S_{ui} = - \rho LAD C_D U u_i \quad (15)$$

No presente trabalho, portanto, as árvores foram representadas por meio poroso geradas a partir da separação de células dentro do domínio computacional, conforme mostra a Figura 11. A partir disso, interfaces foram formadas para conectar o domínio externo (toda a geometria, exceto a vegetação) ao subdomínio (região da vegetação). Considerando a metodologia empregada, o coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ) foi calculado baseado em dois parâmetros principais de caracterização da vegetação, a densidade de área foliar (LAD) e o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ), descrito na equação (9) apresentada na seção 3.2, e reapresentada a seguir:

$$C_i = LAD C_D \quad (16)$$

Outro ponto que diferencia a barreira vegetal é sua distribuição de porosidade, pois barreira artificial geralmente apresenta porosidade uniforme ao longo da altura, enquanto na barreira de vento composta por árvores essa capacidade de resistência imposta pela porosidade não é uniforme verticalmente, assim como muitas vezes apresenta variações na extensão transversal.

A distribuição variada da densidade de área foliar tem efeitos sobre o escoamento do vento (DESMOND et al., 2014; LIU et al., 2018). Assim, a variação da densidade foliar expressa pelo coeficiente de resistência inercial para modelagem em barreira vegetal, pode influenciar o campo de velocidade e turbulência do escoamento. Estudos mostraram que a modelagem da vegetação utilizando a distribuição de LAD em função da altura fornece uma melhor representação do efeito da resistência imposta pelos elementos da vegetação ao escoamento do ar (DESMOND et al., 2014; ZENG et al., 2020).

Lalic e Mihailovic (2004) encontraram uma expressão que descreve a densidade de área foliar com a altura. Sua descoberta tem sido largamente aplicada e forneceu bons resultados em diversos estudos sobre o efeito da vegetação no escoamento, principalmente na redução da velocidade do vento. Assim, visando a melhor precisão dos resultados simulados aos dados experimentais, no presente trabalho, nas simulações em CFD a distribuição do LAD será realizada utilizando a equação (13), dada por Lalic e Mihailovic (2004) apresentada na seção 3.2, e reapresentada a seguir:

$$LAD(z) = LAD_{m\acute{a}x} \left( \frac{H - H_{m\acute{a}x}}{H - z} \right)^N \exp \left[ N \left( 1 - \frac{H - H_{m\acute{a}x}}{H - z} \right) \right] \quad (17)$$

onde, H é a altura da árvore,  $LAD_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo de LAD e  $H_{m\acute{a}x}$  é a altura de LAD máximo. N varia de acordo com a formação da vegetação, expressando a abertura e/ou circunferência do dossel da vegetação (LALIC; MIHAILOVIC, 2004).

Diferente do estudo de Lalic e Mihailovic (2004), onde a melhor concordância das características morfológicas da vegetação foi encontrada para estratificação de N, assumindo os valores de  $N=6$  para  $z < H_{m\acute{a}x}$  e  $N = 0,5$  para  $z > H_{m\acute{a}x}$ , no presente trabalho, foi utilizado um valor de N fixo nos casos avaliados, sendo este escolhido considerando as características morfológicas da vegetação utilizada no estudo experimental de túnel de vento de Miri et al. (2017). É importante destacar também que a estratificação de N na equação de Lalic e Mihailovic (2004) para os casos simulados não apresentam importante variação na formação do perfil vertical de LAD, como pode ser verificado na Figura 13.

Na Figura 13 é apresentada a comparação dos perfis verticais de LAD utilizando a estratificação de N na altura e considerando um valor fixo de N. Como pode ser observado, a variação do perfil vertical com estratificação de N para a altura do LAD máximo apresentou sutil modificação na configuração do dossel na parte superior para  $H_{m\acute{a}x} = 85\%$ , sendo semelhantes para  $H_{m\acute{a}x} = 90\%$  e  $95\%$ . Dessa forma, é possível sugerir que a estratificação do valor N passa a ser importante apenas para o decaimento da curva para valores de  $H_{m\acute{a}x} < 85\%$ .

É importante destacar que apesar das diferenças morfológicas das plantas utilizadas no experimental de Miri, Dragovich e Dong (2017), simulações numéricas iniciais mostraram pequenas diferença nos resultados do escoamento. Assim, considerou-se para validação e análises dos casos apresentados no presente trabalho a semelhança entre as plantas. O perfil vertical na Figura 13c foi escolhido para representar as espécies *C. bipinnatus* e *L. lucidum* na modelagem numérica, considerando a morfologia das plantas usadas no experimental de Miri et. al. (2017). Para isso, foram utilizadas o valor de  $LAD_{m\acute{a}x} = 1m^2/m^3$ ,  $N = 2$  e  $H_{m\acute{a}x} = 95\%$ , caso I apresentado na Tabela 1.

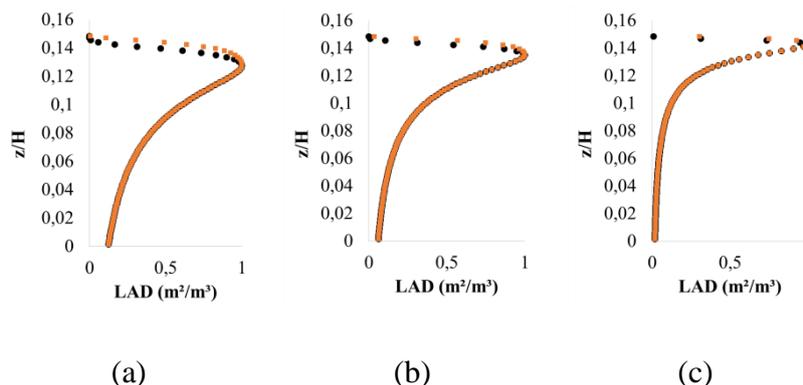


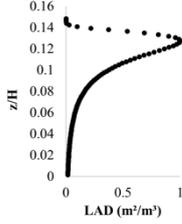
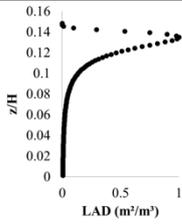
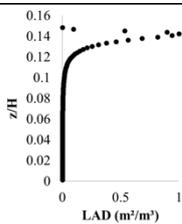
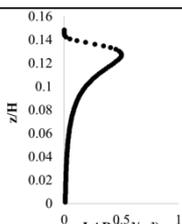
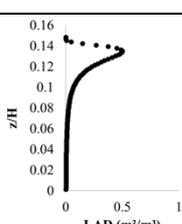
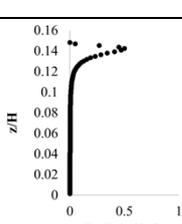
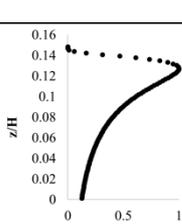
Figura 13: Comparação dos perfil verticais de distribuição do LAD descrito pela equação de Lalic e Mihailovic (2004) para a estratificação de  $N$  em  $H_{\text{máx}}$  (quadrado laranja) e considerando um valor fixo de  $N$  (círculo preto). Nos gráficos (a), (b) e (c) o quadrado laranja, o perfil de LAD é descrito considerando a extratificação de  $N$ , onde para  $z < H_{\text{máx}}$   $N=2$  e para  $z > H_{\text{máx}}$ ,  $N=0,5$ . No círculo preto, o perfil é descrito com  $N=2$  para  $0 > z > H$ .

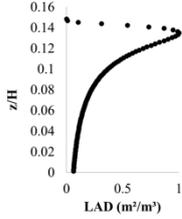
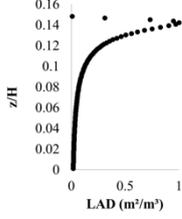
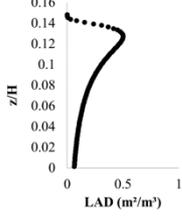
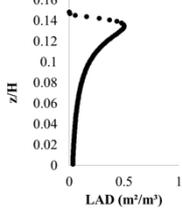
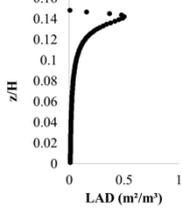
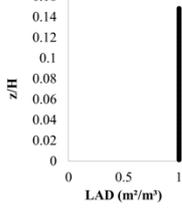
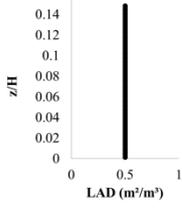
Considerando a variação da morfologia das árvores presente na atmosfera e a influência de sua composição foliar na capacidade de redução da velocidade do escoamento do vento, a sensibilidade dos parâmetros morfológicos da vegetação no comportamento do escoamento vento será investigada com a implementação da equação desenvolvida por Lalic e Mihailovic (2004), de acordo com os parâmetros da equação que descrevem a resistência imposta pelas plantas ao escoamento do vento.

Na Tabela 1 estão descritos os casos simulados no estudo da sensibilidade, os valores de LAD e a distribuição vertical do LAD( $z$ ) utilizando a equação de Lalic e Mihailovic (2004) apresentada no gráfico do perfil vertical de LAD.

Tabela 1: Descrição dos parâmetros morfológicos usados na implementação da vegetação nos casos simulados

| Casos | LAD <sub>máx</sub> | N | H <sub>máx</sub> | Perfil vertical de LAD |
|-------|--------------------|---|------------------|------------------------|
|-------|--------------------|---|------------------|------------------------|

|        |                                       |   |     |   |
|--------|---------------------------------------|---|-----|---|
| Caso A | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 4 | 85% |    |
| Caso B | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 4 | 90% |    |
| Caso C | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 4 | 95% |    |
| Caso D | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 4 | 85% |   |
| Caso E | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 4 | 90% |  |
| Caso F | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 4 | 95% |  |
| Caso G | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 2 | 85% |  |

|        |                                       |   |     |   |
|--------|---------------------------------------|---|-----|---|
| Caso H | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 2 | 90% |    |
| Caso I | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 2 | 95% |    |
| Caso J | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 2 | 85% |    |
| Caso K | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 2 | 90% |  |
| Caso L | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 2 | 95% |  |
| Caso M | 1 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )   | 0 | --  |  |
| Caso N | 0,5 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 0 | --  |  |

Os casos descritos na Tabela 1 foram simulados para diferentes variações de área plantada (baixa, média e alta densidades) utilizando diferentes modelos de turbulência, os quais foram:  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST. Assim, a capacidade dos modelos de turbulência na representação do escoamento implementando as características morfológicas da vegetação foi avaliada.

#### **4.1.2 Escoamento em barreira porosa artificial**

##### 4.1.2.1 Detalhes do experimento conduzido por Dong et al. (2007, 2010)

Nesse item são apresentados os detalhes do experimento em túnel de vento realizado por Dong et al. (2007, 2010) a ser modelado no presente trabalho. Os estudos experimentais de Dong et al. (2007 e 2010) foram escolhidos para validação das simulações do escoamento em barreiras de vento porosas artificiais devido ao nível de detalhamento e informações fornecidos na literatura. Os autores investigaram a influência da porosidade da barreira artificial no escoamento e realizaram medições detalhadas do campo de velocidade e turbulência na região a jusante de modelos de barreira de vento porosa utilizando a técnica PIV. Essa abordagem tem a vantagem de fornecer informações mais detalhadas sobre escoamento que se desenvolve ao redor da barreira, permitindo a medição em alta frequência das componentes horizontal longitudinal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) da velocidade, além da determinação das estruturas de turbulência.

A Figura 14 representa o experimento de túnel de vento realizado por Dong et al. (2007 e 2010), onde  $H$  é a altura da barreira,  $W$  a largura,  $B$  a espessura da barreira,  $U_\infty$  a velocidade do vento na corrente livre e o sistema de coordenadas utilizado segundo o posicionamento de cada eixo.

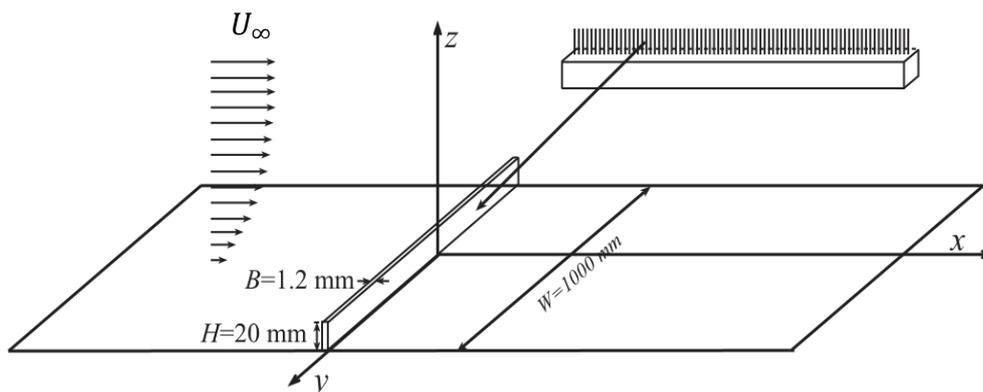


Figura 14: Representação esquemática dos experimentos conduzidos por Dong et al., 2010 com barreira artificial (Adaptado de Dong et al., 2010).

Os perfis medidos por Dong et al. (2010) fornecem dados do comportamento da velocidade nas posições de  $0H$  a  $35H$  a jusante da barreira, obtidos da superfície do túnel de vento até  $5H$ . Na horizontal, os pontos foram avaliados a jusante da barreira de vento nas posições de  $x = 0H$ ;  $0,5H$ ;  $1,5H$ ;  $3H$ ;  $5H$ ;  $10H$ ;  $15H$ ;  $25H$  e  $35H$ . Foram avaliados os escoamentos em barreiras artificiais com  $0\%$ ,  $20\%$ ,  $40\%$ ,  $60\%$  e  $80\%$  de porosidade.

#### 4.1.2.2 Representação física e matemática da barreira porosa artificial

Diversas equações são utilizadas na literatura para descrever a relação da porosidade com o coeficiente de resistência inercial, no entanto pouco autores avaliaram o impacto dessas equações no comportamento do escoamento do vento, redução da velocidade e turbulência. Assim, buscando melhor concordância aos dados experimentais e compreensão de sua influência no comportamento final observado, o coeficiente de resistência inercial será calculado e simulado utilizando diferentes equações que relacionam o coeficiente de resistência a porosidade da barreira conforme apresentado nos trabalhos de Song et al. (2014), Xu; Calay; Mustafa (2019) e Yeh, Tsai; Yang (2010) mostradas na seção 3.2, e rerepresentada a seguir:

Song et al. (2014) estimaram o coeficiente de resistência inercial pela equação a seguir:

$$k_r = \frac{1}{c^2} \frac{(\beta^2 - 1)}{B} \quad (18)$$

onde  $c$  é uma constante que varia em função do número de Reynolds,  $B$  é a espessura (m) e  $\beta$  é a porosidade da barreira, que é calculada como:

$$\beta = \frac{A_0}{A_T} \quad (19)$$

onde  $A_0$  é a área dos poros e  $A_T$  é a área total da barreira.

Xu, Calay e Mustafa (2019) calcularam o termo inercial a partir da equação  $C_i = k_r/B$ , onde o  $k_r$  foi estimado pela relação de Reynolds descrita como:

$$k_r = \frac{0,52 (1 - \beta^2)}{\beta^2} \quad (20)$$

onde  $B$  é a espessura da barreira porosa.

Yeh, Tsai e Yang (2010) calcularam o coeficiente resistência utilizando uma equação empírica dada pelo: diâmetro dos poros, coeficiente de fricção, porosidade e número de Reynolds.  $C_i$  ( $\approx \zeta/B$ ) é o coeficiente de resistência inercial que foi calculado pela equação empírica dada por:

$$\zeta_{1KB} = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \omega_1^2}{2}} = \left[ \zeta_0 + \lambda \frac{B}{d_r} \right] \frac{1}{\beta^2} \quad (21)$$

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \omega_1^2}{2}} = \zeta_\phi \frac{1}{\beta^2} + \frac{1}{\varepsilon_{0Re}} \zeta_{1KB} \quad (22)$$

onde  $\zeta_0$  é uma constante determinada pela porosidade conforme apresenta,  $B$  é a espessura da barreira,  $d_r$  é o diâmetro hidráulico calculado como  $d_r = 4HW/2(H+W)$ , sendo  $W$  a largura da barreira,  $\lambda$  é o coeficiente de fricção calculado pelo número Reynolds ( $= 0,3164 / Re^{0,25}$ ),  $\beta$  é a porosidade. Os parâmetros  $\varepsilon_{0Re}$  e  $\zeta_\phi$  são definidos de acordo com a porosidade e o número de Reynolds calculados e apresentados na tabela da Figura 15.

Tabela 2: Valor corresponde aos parâmetros da equação de Yeh, Tsai e Yang (2010)

|         |   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\beta$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
|---------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

|           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\zeta_0$ | 1,71 | 1,67 | 1,63 | 1,59 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,39 | 1,32 | 1,22 | 1,00 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|

Fonte: Adaptado de Yeh, Tsai e Yang (2010)

$\zeta_{kB}$  é uma correção realizada para o cálculo total do  $\zeta = \Delta p / \frac{\rho \omega_1^2}{2}$ . O valor total da variação de pressão é calculado pela soma das perdas local de atrito e atriti do fluido dado por  $\zeta_0$  estimado em função da porosidade, ver Tabela 2.

| $\beta$ | Re                       |      |      |        |                 |                 |        |
|---------|--------------------------|------|------|--------|-----------------|-----------------|--------|
|         | $\frac{25}{\beta_{0Re}}$ | 40   | 60   | $10^2$ | $2 \times 10^2$ | $4 \times 10^2$ | $10^3$ |
|         | 0.34                     | 0.36 | 0.37 | 0.40   | 0.42            | 0.46            | 0.53   |
|         | $\zeta_{\varphi}$        |      |      |        |                 |                 |        |
| 0       | 1.94                     | 1.38 | 1.14 | 0.89   | 0.69            | 0.64            | 0.39   |
| 0.2     | 1.78                     | 1.36 | 1.05 | 0.85   | 0.67            | 0.57            | 0.36   |
| 0.3     | 1.57                     | 1.16 | 0.88 | 0.75   | 0.57            | 0.43            | 0.30   |
| 0.4     | 1.35                     | 0.99 | 0.79 | 0.57   | 0.40            | 0.28            | 0.19   |
| 0.5     | 1.10                     | 0.75 | 0.55 | 0.34   | 0.19            | 0.12            | 0.07   |
| 0.6     | 0.85                     | 0.56 | 0.30 | 0.19   | 0.10            | 0.06            | 0.03   |
| 0.7     | 0.58                     | 0.37 | 0.23 | 0.11   | 0.06            | 0.03            | 0.02   |
| 0.8     | 0.40                     | 0.24 | 0.13 | 0.06   | 0.02            | 0.02            | 0.01   |
| 0.9     | 0.20                     | 0.13 | 0.08 | 0.03   | 0.01            | 0               | 0      |
| 0.95    | 0.03                     | 0.03 | 0.02 | 0      | 0               | 0               | 0      |

| $\beta$ | Re                                  |                 |        |                 |        |                 |        |
|---------|-------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|         | $\frac{2 \times 10^3}{\beta_{0Re}}$ | $4 \times 10^3$ | $10^4$ | $2 \times 10^4$ | $10^5$ | $2 \times 10^5$ | $10^6$ |
|         | 0.59                                | 0.64            | 0.74   | 0.81            | 0.94   | 0.96            | 0.98   |
|         | $\zeta_{\varphi}$                   |                 |        |                 |        |                 |        |
| 0       | 0.30                                | 0.22            | 0.15   | 0.11            | 0.04   | 0.01            | 0      |
| 0.2     | 0.26                                | 0.20            | 0.13   | 0.09            | 0.03   | 0.01            | 0      |
| 0.3     | 0.22                                | 0.17            | 0.10   | 0.07            | 0.03   | 0.01            | 0      |
| 0.4     | 0.14                                | 0.10            | 0.06   | 0.04            | 0.02   | 0.01            | 0      |
| 0.5     | 0.05                                | 0.03            | 0.02   | 0.01            | 0.01   | 0.01            | 0      |
| 0.6     | 0.02                                | 0.01            | 0.01   | 0               | 0      | 0               | 0      |
| 0.7     | 0.01                                | 0               | 0      | 0               | 0      | 0               | 0      |
| 0.8     | 0                                   | 0               | 0      | 0               | 0      | 0               | 0      |
| 0.9     | 0                                   | 0               | 0      | 0               | 0      | 0               | 0      |
| 0.95    | 0                                   | 0               | 0      | 0               | 0      | 0               | 0      |

Figura 15: Valores correspondente aos parâmetros de Yeh, Tsai e Yang (2010) (Adaptado de Yeh, Tsai e Yang, 2010).

Assim, são apresentados na Figura 16 o fluxograma com os cenários avaliados e a descrição de cada caso simulado no presente estudo, bem como os métodos de implementação do coeficiente de resistência em função da porosidade, as porosidades e os modelos de turbulência utilizados na simulação dos casos de barreiras artificiais.

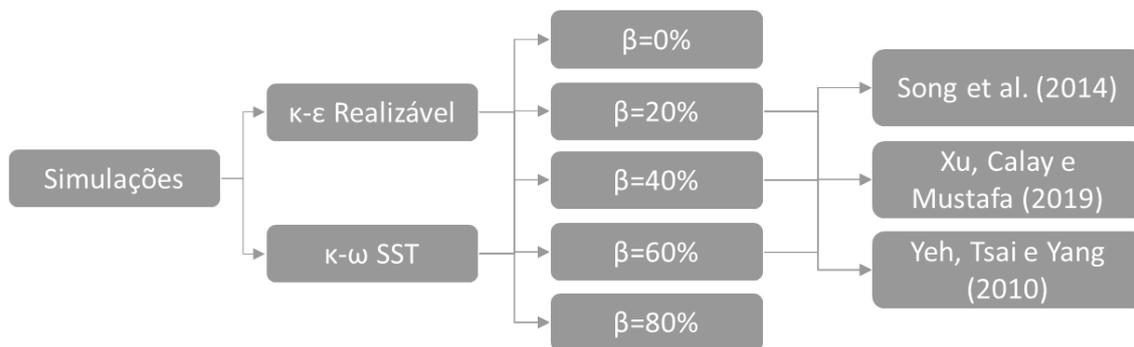


Figura 16: Fluxograma de descrição dos casos, modelagem da turbulência, e equações utilizados no presente estudo em barreiras de vento artificiais.

As equações (18) - (22) foram utilizadas para modelar o coeficiente de resistência inercial nas barreiras de vento com 20%, 40% e 60% de porosidade. A barreira porosa com 80% foi modelada considerando a formação estrutural do modelo em escala reduzida utilizado por Dong et al. (2007; 2010). No experimental, os autores usaram uma barreira de vento composta por hastes verticais posicionadas com diferentes espaçamentos de acordo com a porosidade a ser simulada, metodologia utilizada na modelagem numérica para 80%. Na simulação numérica a variação no valor do coeficiente de resistência modelado considerando  $C_i=0$  (parte vazia) e  $C_i= 1000000$  (haste sólida) no intervalo de 0.0012m ( $C_i= 1000000$ ) e 0,0036m ( $C_i=0$ ) no eixo y.

A Figura 17 apresenta o fluxograma com uma pequena descrição dos parâmetros que serão avaliados pelo presente trabalho, de acordo com o tipo de barreira de vento analisada, considerando o métodos de implementação da modelagem matemática para descrição da resistência causada pela barreira de vento e demais aspectos da modelagem da turbulência na simulação numérica.

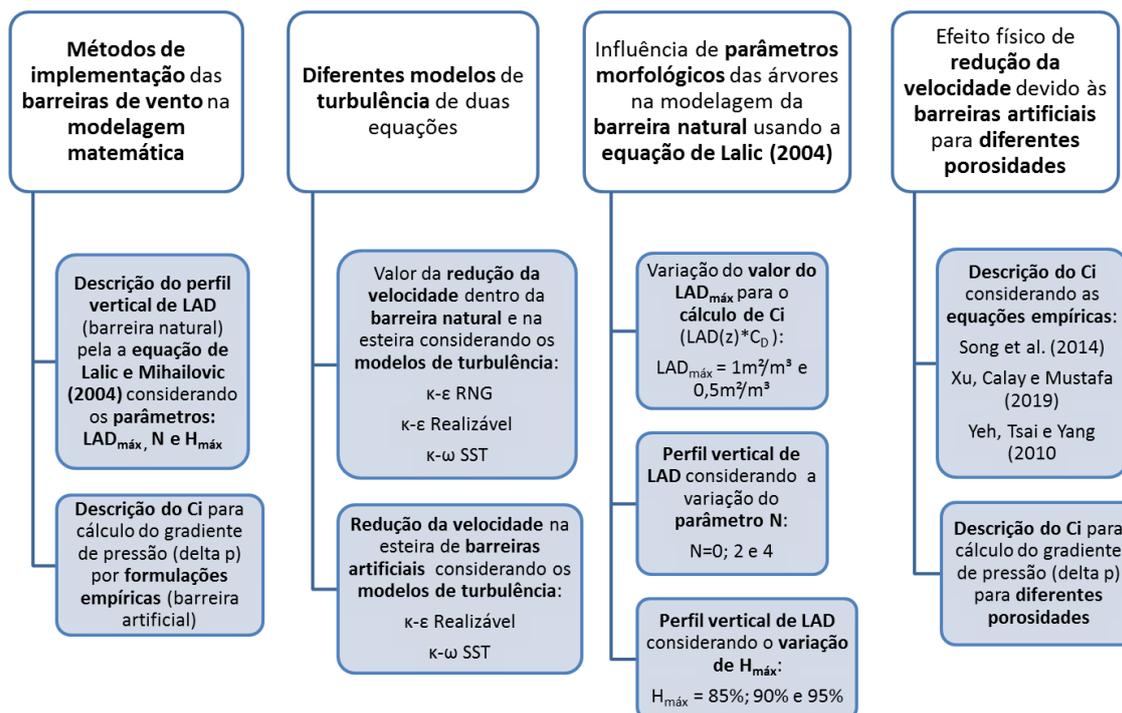


Figura 17: Síntese das etapas e parâmetros apresentados na metodologia que serão avaliados no presente estudo.

## 4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste item serão apresentadas as equações governantes do transporte de massa e quantidade de movimento relativas aos escoamentos a serem estudados conforme apresentado no item 4.1. Além das equações governantes, são apresentados também o modelo de turbulência selecionado e as condições de contorno necessárias à solução das equações diferenciais a serem solucionadas pelo método numérico que está descrito no item 4.3.

### 4.2.1 Equações governantes e a modelagem da turbulência

O escoamento atmosférico é governado pelas equações de transporte de conservação de massa, quantidade de movimento e energia - equações (23) a (25). Neste trabalho, assume-se a condição de atmosfera neutra, onde o perfil vertical de temperatura é adiabático e a equação de energia não precisa ser resolvida, pois a temperatura potencial é constante. Além disso, considera-se que o escoamento é incompressível, uma vez que a variação de pressão observada não é grande o suficiente para produzir variações de

densidade. Assim, as equações governantes resolvidas são conservação de massa e momentum para um fluido Newtoniano:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \rho g_i + S_{ui} \quad (24)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \theta) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{k_c}{c_p} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \right] \quad (25)$$

onde:  $u_i$  corresponde a componente de velocidade na direção  $i$  (m/s),  $\mu$ , a viscosidade molecular do fluido (kg/m.s),  $p$  a pressão (kg/m.s<sup>2</sup>),  $c_p$  o calor específico a pressão constante (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>.T),  $k_c$  a condutividade térmica do ar (kg.m/T.s<sup>3</sup>),  $\theta$  é a temperatura potencial (K),  $g_i$  é a gravidade (m/s<sup>2</sup>) e  $S_{ui}$  é o termo fonte.

Segundo Yaping Shao (2008) para resolver numericamente o escoamento turbulento na atmosfera, as equações governantes e suas condições de contorno devem ser discretizadas no tempo e no espaço. Dependendo da resolução da malha a metodologia de solução pode ser classificada em:

- Simulação Numérica Direta – DNS: os fluxos turbulentos são discretizados e resolvidos numericamente para todas as escalas da turbulência, não havendo aproximações ou simplificações no tratamento da turbulência, sendo que os erros estão relacionados apenas ao método numérico utilizado (CALIMAN, 2017).
- Simulação de Grandes Escalas – LES: os fluxos turbulentos são divididos em duas escalas da turbulência, ou seja, as grandes escalas e pequenas escalas. Assim, as grandes são resolvidas e as pequenas escalas são modeladas por um modelo de submalha.
- Modelos baseados nas Equações Médias de Reynolds – RANS: nessa classificação todas as escalas da turbulência são modeladas baseadas unicamente nas equações médias de Reynolds.

Contudo a DNS apresenta alto custo computacional, pois, requer que a malha seja muito refinada com tamanho de grade menor que as escalas de Kolmogorov, enquanto o LES revela bons resultados nos estudos do campo de fluxo e estruturas 3-D formados ao redor de *windfence* em escala reduzida (BASNET; CONSTANTINESCU, 2019). Porém, a comparação do tempo de processamento entre LES e RANS ainda é significativa (TOMINAGA; STATHOPOULOS, 2010), por isso os modelos RANS são frequentemente usados para descrever os efeitos da turbulência devido à baixa demanda computacional comparada ao DNS e LES (EFTHIMIOU et al., 2017).

Diversos trabalhos que utilizaram a abordagem RANS na modelagem e análise do escoamento em diferentes tipos de barreiras de vento são encontrados na literatura (DESMOND, WATSON; HANCOCK, 2017; SANTIAGO et al., 2007; SONG et al., 2014; YEH; TSAI; YANG, 2010). Eles destacam a boa capacidade de modelos RANS na predição dos campos de fluxos ao redor de barreiras de vento.

Conforme proposto por Osborne Reynolds, as propriedades instantâneas do escoamento turbulento podem ser escritas como sendo a soma de um valor médio e sua flutuação:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (26)$$

As variáveis decompostas são introduzidas nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento sendo calculadas sobre um intervalo de tempo suficientemente grande para exceder as escalas de tempo dos maiores vórtices. Assim, assumindo que o escoamento médio é permanente, as equações governantes podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i' u_j'}) + \rho g_i + S_{ui} \quad (28)$$

A influência da turbulência no escoamento médio é caracterizada pelo o termo  $\overline{\rho u_i' u_j'}$ , o tensor de Reynolds, que é considerado um tensor simétrico com seis componentes independentes. Dessa forma, o número de variáveis desconhecidas (pressão, três componentes de velocidade e seis tensões) é maior que o número de equações disponíveis

(continuidade e quantidade de movimento). Como resultado, o sistema de equações ainda não está fechado e o problema de fechamento é reduzido à modelagem das tensões de Reynolds em termos de quantidades médias.

Uma abordagem muito utilizada para modelar o termo  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  é a analogia proposta por Boussinesq, no qual correlaciona as tensões de Reynolds com a taxa de tensão do movimento médio a partir da analogia entre os movimentos moleculares e turbulentos. Assim, semelhante a tensão molecular viscosa, as tensões de Reynolds (turbulência) são modeladas da seguinte forma:

$$\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} - \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

onde  $\kappa$  é a energia cinética turbulenta ( $1/2 (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ ),  $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$  é a viscosidade cinemática turbulenta,  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker. A viscosidade turbulenta, diferente da viscosidade molecular, não é constante, e pode variar significativamente no escoamento (ARGYROPOULOS; MARKATOS, 2015).

Os modelos de turbulência baseados na viscosidade turbulenta podem ser classificados de acordo com o número de equações adicionais a serem resolvidas como: (i) Modelo linear sem equação diferencial adicional, (ii) Modelo com uma equação diferencial, e (iii) Modelo com duas equações diferenciais.

Os modelos de zero equação são assim chamados pois não apresentam nenhuma equação diferencial. Eles utilizam equações algébricas para resolver as grandezas da turbulência. Esta classe de modelos é caracterizada pela simplicidade de implementação, no entanto, não é adequado para prever fluxos com recirculação e separação (ARGYROPOULOS; MARKATOS, 2015).

Modelos de uma equação utilizam uma equação diferencial para descrever o transporte da energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ). No entanto, para fechar o sistema, ainda é necessário prescrever uma escala de comprimento turbulento  $l$ , que geralmente é baseada em dados experimentais. Para escoamentos complexos com escoamentos elípticos, como aqueles

contendo recirculações e regiões de separação, os dados experimentais geralmente não estão disponíveis, tornando difícil prescrever algebricamente essa escala de comprimento.

Os modelos de duas equações incluem duas equações diferenciais adicionais para descrever as quantidades de turbulência. Uma descreve a geração de turbulência, equação para energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ), enquanto a outra equação descreve a dissipação para o transporte da conservação. A dissipação da turbulência geralmente é expressa pela taxa de dissipação da energia cinética de turbulência ( $\varepsilon$ ) ou a taxa de dissipação específica ( $\omega$ ).

Os modelos de duas equações são os mais utilizados pois fornecem boa capacidade de predição dos fluxos turbulentos em estudos na camada limite atmosférica alinhado ao menor custo computacional quando comparado a modelos RANS superiores, como os Tensores de Reynolds (BADR; HARION, 2007; SAN; ZHAO; QIU, 2019; TOMINAGA et al., 2008; YEH; TSAI; YANG, 2010).

O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  proposto por Launder e Sharma (1974) é o mais utilizado dos modelos de duas equações. O modelo de viscosidade turbulenta  $\kappa - \varepsilon$  padrão é um modelo de fechamento de primeira ordem com duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta ( $\kappa$  e  $\varepsilon$ ). Neste modelo a viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_{\text{turb}} = C_{\mu} \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (30)$$

onde  $\kappa$  é a energia cinética turbulenta [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ],  $\varepsilon$  é a dissipação da energia cinética turbulenta [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ] e  $C_{\mu}$  é uma constante empírica do modelo. Um valor usual de  $C_{\mu}$  é 0,09 (LAUNDER; SPALDING, 1974). Para determinar os valores da energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ) e da dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ), são resolvidas duas equações diferenciais adicionais. No modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão as variáveis  $\kappa$  e  $\varepsilon$  são calculados pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\rho \sigma_{\kappa}} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_{\kappa}}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} - \varepsilon - \frac{Y_M}{\rho} + \frac{S_{\kappa}}{\rho} \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - \frac{C_{2\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \quad (32)$$

onde  $G_\kappa$  e  $G_b$  representam a produção de energia cinética turbulenta causados pelos gradientes de velocidade média e flutuabilidade respectivamente.  $Y_M$  representa a contribuição da expansão de flutuação turbulenta compressível na taxa de dissipação geral.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes,  $\sigma_\kappa$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl efetivo inverso para  $\kappa$  e  $\varepsilon$  respectivamente.  $S_\kappa$  e  $S_\varepsilon$  termos fonte definidos.

Este modelo apresenta boa previsão de escoamentos turbulentos. No entanto, é incapaz de prever com precisão escoamentos com gradientes de pressão adversos. Apesar das deficiências, o modelo é recomendado para uma estimativa mais grosseira do campo de escoamento, sem a necessidade de grandes detalhamentos (ARGYROPOULOS; MARKATOS, 2015). Melhorias e modificações foram incorporadas ao modelo ao longo do tempo, cujos os principais são Grupo de Renormalização e Realizável.

O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG proposto por Yakhot e Orszag (1986) é uma modificação do modelo clássico  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão. Este modelo é derivado das equações instantâneas de Navier-Stokes aplicando o método matemático chamado Grupo de Renormalização, o equacionamento completo da formulação do modelo é apresentado por Yakhot e Orszag (1986). No modelo as equações diferenciais de transporte de  $\kappa$  e  $\varepsilon$  são descritas como:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\sigma_\kappa \mu_{\text{turb}}}{\rho} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\kappa}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} - \varepsilon - \frac{Y_M}{\rho} + \frac{S_\kappa}{\rho} \quad (33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\sigma_\varepsilon \mu_{\text{turb}}}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - \frac{C_{2\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \quad (34)$$

onde  $G_\kappa$  e  $G_b$  representam a produção de energia cinética turbulenta causados pelos gradientes de velocidade média e flutuabilidade, respectivamente.  $Y_M$  representa a contribuição da expansão de flutuação turbulenta compressível na taxa de dissipação geral.  $\sigma_\kappa$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl efetivo inverso para  $\kappa$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.  $S_\kappa$  e  $S_\varepsilon$  termos fonte definidos.

A derivação analítica resulta em um modelo com termos e funções adicionais nas equações de transporte de  $\kappa$  e  $\varepsilon$ . O termo adicional  $R_\varepsilon$  é descrito como:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \vartheta \eta^3} \kappa \quad (35)$$

Na equação de  $\varepsilon$ , os terceiro e quartos termos podem ser acoplados e a equação pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\sigma_\varepsilon \mu_{\text{turb}}}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - \frac{C_{2\varepsilon}^* \varepsilon^2}{\rho \kappa} + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \quad (36)$$

onde  $C_{2\varepsilon}^*$  é dado por:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \vartheta \eta^3} \quad (37)$$

onde  $\eta = S \frac{\kappa}{\varepsilon}$ ,  $\eta_0 = 4,38$  e  $\vartheta = 0,012$

Como um dos resultados, há uma melhora da precisão dos escoamentos de deformação rápida. Além disso, na descrição da formulação do modelo, é adicionado os efeitos da vorticidade do escoamento médio, proporcionando maior desempenho na predição de fluxos rotativos. Assim, o modelo RNG apresenta melhora na previsão de escoamentos envolvendo curvatura e rápida deformação.

O  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável (SHIH et al., 1995) apresenta uma nova formulação para a viscosidade turbulenta e equação de transporte da taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ).

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\kappa}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} - \varepsilon \frac{Y_M}{\rho} + \frac{S_\kappa}{\rho} \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{\text{turb}}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 S_\varepsilon}{\rho} - \frac{C_2}{\rho} \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_{3\varepsilon} G_b \quad (39)$$

onde

$$C_1 = \max \left[ 0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{\kappa}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (40)$$

Este modelo apresenta importantes diferenças na modelagem do termo de dissipação quando comparado aos modelos  $\kappa$ - $\varepsilon$  clássico e RNG. Na equação de transporte de  $\varepsilon$ , os termos de produção de energia cinética turbulenta não são incluídos. A principal diferença

do modelo é a forma como  $C_\mu$  é computada. Ela deixa de ser uma constante e passa a ser uma função descrita por:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{\kappa U^*}{\varepsilon}} \quad (41)$$

onde

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \bar{\Omega}_{ij}\bar{\Omega}_{ij}}, \quad \bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (42)$$

onde  $\bar{\Omega}_{ij}$  é o tensor da taxa de rotação média visto em um referencial móvel com a velocidade angular  $\omega_k$ . As constantes  $A_0$  e  $A_s$  do modelo são dados por:

$$A_0 = 4,04, \quad A_s = \sqrt{6\cos\varphi} \quad (43)$$

Como resultado, ele fornece um desempenho superior para escoamento envolvendo rotação, camada limite sob forte gradiente adverso de pressão, separação e recirculação (LATEB et al., 2013).

Os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  normalmente requerem termos extras nas equações para explicar o amortecimento da turbulência que ocorre próximo às paredes, cuja função é garantir o comportamento limitante adequado de  $\kappa$  e  $\varepsilon$  na parede.

O modelo  $\kappa$ - $\omega$  (WILCOX, 1998) apresenta importantes vantagens em relação aos modelos  $\kappa$ - $\varepsilon$ , pois tem maior precisão nas camadas próximas da parede, fornecendo melhores previsões para camadas limites com gradiente de pressão adverso, sem necessidade de funções adicionais de amortecimento (ARGYROPOULOS; MARKATOS, 2015). Foi especialmente projetado para escoamento de cisalhamento livre e também é muito adequado para fluxos complexos.

O modelo  $\kappa$ - $\omega$  possui uma variante melhorada, que é o  $\kappa$ - $\omega$  SST (*Shear Stress Transport*). Proposto por Menter (1994), este é um modelo híbrido que combina as vantagens dos modelos  $\kappa$ - $\varepsilon$  e  $\kappa$ - $\omega$ . Ele usa a formulação do  $\kappa$ - $\omega$  na região da próxima à parede e depois gradualmente a de  $\kappa$ - $\varepsilon$  migrando para a região externa, sendo essa passagem realizada por uma função de troca. No modelo as quantidades de  $\kappa$  e  $\omega$  são calculadas pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\kappa \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\kappa}{\rho} - \frac{Y_\kappa}{\rho} + \frac{S_\kappa}{\rho} \quad (44)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\omega}{\rho} - \frac{Y_\omega}{\rho} + \frac{D_\omega}{\rho} + \frac{S_\omega}{\rho} \quad (45)$$

onde  $G_\kappa$  representa a produção de energia cinética turbulenta causados pelos gradientes de velocidade média.  $G_\omega$  representa a geração de  $\omega$ .  $Y_\kappa$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de  $\kappa$  devido a turbulência.  $D_\omega$  representa o termo de difusão cruzada.  $S_\kappa$  e  $S_\omega$  termos fonte definidos.  $\Gamma_\kappa$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade efetiva de  $\kappa$  e  $\omega$ , os quais são computados como segue:

$$\Gamma_\kappa = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \quad (46)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (47)$$

onde  $\sigma_\kappa$  e  $\sigma_\omega$  são número de Prandtl turbulento para  $\kappa$  e  $\omega$ , respectivamente.  $\mu$  é a viscosidade molecular e a viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ) é calculada como:

$$\mu_t = \frac{\rho \kappa}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (48)$$

onde  $S$  é magnitude da taxa de deformação

$$\sigma_\kappa = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\kappa,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{\kappa,2}}} \quad (49)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (50)$$

As funções  $F_1$  e  $F_2$ , são dadas por:

$$F_1 = \tanh(\phi_1^4) \quad (51)$$

$$\phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{\kappa}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \kappa}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (52)$$

$$D_{\omega}^{+} = \text{máx} \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (53)$$

$$F_2 = \tanh(\phi_2^2) \quad (54)$$

$$\phi_2 = \text{máx} \left[ 2 \frac{\sqrt{\kappa}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (55)$$

onde  $y$  é a distância para a superfície e  $D_{\omega}^{+}$  é a porção positiva do termo de difusão cruzada.

Os resultados mostram que o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST apresenta melhores resultados para escoamentos com gradiente de pressão adverso, além de fornecer maior precisão na previsão de zonas de separação induzidas por pressão, assim como na interação de regiões viscosas e não viscosas (sub-camada laminar) do escoamento na região próxima à parede (BADR, 2007; TURPIN, 2010).

A modelagem numérica do campo de escoamento para avaliação da redução da velocidade ao redor das barreiras de vento, naturais e artificiais, será realizada com a utilização de modelos RANS de duas equações diferenciais. Esta classe de modelos tem mostrado boa capacidade de predição do escoamento e satisfatória previsão dos campos de velocidade e turbulência (BUCCOLIERI et al., 2018; DESMOND; WATSON; HANCOCK, 2017; HONG; LEE; SEO, 2015; LIU et al., 2014; LIU et al., 2018; SAN; ZHAO; QIU, 2019; SANTIAGO et al., 2007; ZENG et al., 2020). Além disso, o custo computacional associado a predição é muito maior que ao de outros modelos como o LES e modelos RANS dos Tensores de Reynolds, os quais são, respectivamente, 25 vezes e 6 vezes o tempo de processamento (TOMINAGA; STATHOPOULOS, 2010). Importante salientar que os estudos em barreira de vento têm usado modelos que necessitam de equações adicionais para tratamento das regiões próximas a parede, como os modelos  $\kappa$ - $\epsilon$  e suas modificações  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável. No entanto, bons resultados de predição do escoamento turbulento em barreira de vento foram obtidos utilizando modelos com maior precisão próximo a parede, que não utilizam funções adicionais para tratamento da parede, como o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST (LIU et al., 2014). Esse modelo é conhecido por apresentar resultados com boa precisão do comportamento do escoamento na superfície e próximo a ela, fator fundamental para a análise da erosão eólica, que é um dos objetivos do presente trabalho.

Assim sendo, a capacidade de diferentes modelos será avaliada, associada as características de malha necessária para cada modelo, de forma a identificar a capacidade de predição e as possíveis limitações dos modelos para o caso em estudo, com intuito de avaliar o comportamento da velocidade de fricção na região de abrigo da barreira porosa e obter resultados satisfatórios associados a um custo computacional viável.

#### 4.2.2 Inclusão dos efeitos das barreiras vegetal e artificial porosa nas equações de transporte e nos modelos de turbulência

Nesta seção é apresentado a descrição matemática da implementação do termo fonte nas equações de quantidade de movimento e turbulência para uma barreira porosa artificial e vegetal.

Conforme apresentado na seção 3.2, o efeito de resistência gerado pela barreira porosa é introduzido na equação de quantidade de movimento (descrita pela equação (24) mostrada na seção 4.2.1) pela adição de um termo fonte ( $S_{ui}$ ), que representa as forças de pressão e viscosas que atuam na barreira porosa.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) + \rho g_i + S_{ui} \quad (56)$$

A equação a seguir descreve a resistência ao escoamento causada por uma barreira porosa por meio da queda de pressão, resultado da ação das forças viscosas do escoamento e da força de arrasto sobre a barreira, dados como já apresentada na seção 3.2 por:

$$\Delta p = - \left( \frac{\mu}{\alpha} \right) u_i + \frac{1}{2} C_i \rho U u_i \quad (57)$$

onde  $\Delta p$  é a queda de pressão gerada pela barreira porosa ( $\text{kg/m.s}^2$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg/m.s}$ ),  $\alpha$  é a permeabilidade ( $\text{m}^2$ ),  $U$  é a magnitude da velocidade média ( $\text{m/s}$ ),  $u_i$  ( $i=1,2,3$ , indicando as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) é a velocidade média de  $U$  na direção  $i$  ( $\text{m/s}$ ) e  $C_i$  é o coeficiente de resistência inercial (adimensional), que é estimado em função dos parâmetros aerodinâmicos e/ou morfológicos da barreira porosa.

É importante destacar que  $S_{ui}$  constitui-se um termo fonte volumétrico, dado por força/volume ( $N/m^3$ ), enquanto  $\Delta p$  representa a força incidente na face frontal da barreira, ou seja, na área frontal ( $A_F$ ). Sendo assim,  $\Delta p$  não é inserido na equação, mas é necessário corrigir sua unidade para força/volume, que é realizado dividindo-o pela espessura da barreira porosa ( $B$ ), como apresentado a seguir:

$$S_{ui} = \frac{\Delta p}{B} \quad (58)$$

Para escoamento em vegetação, a contribuição das forças de arrasto viscoso na vegetação pode ser desconsiderada, uma vez que ela é muito pequena quando comparada a contribuição das forças de arrasto de forma do dossel da vegetação no escoamento turbulento.

Na equação de conservação de movimento, para a vegetação, o dossel é representado como um sumidouro, que reproduz a dissipação de quantidade de movimento que as árvores e sua folhagem causam no escoamento, expresso como um termo adicional, escrito como apresentado na seção 3.2 e reescrito a seguir. Este é escrito em função dos parâmetros aerodinâmicos e morfológicos da vegetação, como: densidade de área foliar (LAD) e o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ).

$$S_{ui} = - \rho \text{LAD} C_D U u_i \quad (59)$$

onde o termo fonte  $S_{ui}$  na equação do momento representa a absorção do momento devido ao atrito aerodinâmico nos elementos da folhagem ( $N/m^3$ ),  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg/m^3$ ),  $u_i$  é o componente da velocidade média do vento (m/s),  $U$  é a velocidade média do vento (m/s),  $C_D$  é o coeficiente de arrasto da vegetação (adimensional) e a densidade de área foliar – LAD ( $m^2/m^3$ ). O valor do coeficiente de arrasto varia entre 0,1 e 0,3 para a maior parte da vegetação (KATUL et al., 2004) e a densidade de área foliar ( $m^2/m^3$ ) varia com a espécie de planta.

O dossel da vegetação atua absorvendo a quantidade de movimento do escoamento ao longo de sua extensão vertical, por meio da folhagem. A vegetação atua sobre o escoamento criando próximo ao topo uma camada de mistura, causando a desaceleração na região do dossel. Este comportamento do escoamento ao redor das árvores produz altos níveis cisalhamento, conseqüentemente de turbulência. Porém, o dossel atua também

como um dissipador de turbulência, que converte vórtices de grandes escalas em vórtices de pequenas escalas na esteira de folhagem que se dissipam rapidamente.

Os fenômenos de produção e dissipação, bem como os comportamentos a eles associados, afetam os modelos de turbulência e são representados utilizando termos adicionais as equações dos modelos de turbulência. Termos adicionais como por exemplo  $S_\kappa$  e  $S_\varepsilon$  usadas na modelagem do escoamento ao redor da vegetação com modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$ , como segue:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\alpha_\kappa \mu_{\text{turb}}}{\rho} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\kappa}{\rho} + \frac{G_b}{\rho} - \varepsilon - \frac{Y_M}{\rho} + \frac{S_\kappa}{\rho} \quad (60)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\alpha_\varepsilon \mu_{\text{turb}}}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - \frac{C_{2\varepsilon}}{\rho} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + \frac{S_\varepsilon}{\rho} \quad (61)$$

Os termos fonte/sumidouro,  $S_\kappa$  e  $S_\varepsilon$  ou  $S_\omega$ , modelam os mecanismos de produção e destruição de turbulência devido as estruturas internas do dossel, principalmente termos são então parametrizados pelas equações a seguir:

$$S_\kappa = \rho \text{LAD} C_D \left( \beta_p U^3 - \beta_d U \kappa \right) \quad (62)$$

$$S_\varepsilon = \rho \text{LAD} C_D \left( C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{\kappa} U^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d U \varepsilon \right) \quad (63)$$

$$S_\omega = \rho \text{LAD} C_D \left[ (C_{\varepsilon 4} - 1) \beta_p \frac{\omega}{\kappa} U^3 - (C_{\varepsilon 5} - 1) \beta_d U \omega \right] \quad (64)$$

onde  $\beta_p$  é a fração de energia cinética média convertida em energia cinética turbulenta por meio de arrasto e leva um valor entre 0 e 1,  $\beta_d$  é o coeficiente adimensional para o curto-circuito da cascata de turbulência.  $C_{\varepsilon 4}$  e  $C_{\varepsilon 5}$  são coeficientes empíricos de correção do termo fonte da taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ) (ZENG et al., 2020).

### 4.2.3 Condições de contorno e domínio computacional

#### 4.2.3.1 Cenário com barreira natural

Um domínio computacional tridimensional foi construído seguindo as configurações do experimento físico de túnel de vento realizado por Miri, Dragovich e Dong (2017) (Figura 11). Este domínio foi inicialmente utilizado com precursor para obtenção das condições de velocidade e turbulência de entrada. Posteriormente, foram especificadas as condições de meio poroso onde a separação das células e determinação da vegetação foram realizadas. Para o presente cenário, o fluxo de massa inicial foi calculado baseado na velocidade média de 10 m/s e na área de entrada do domínio computacional (0,5 m x 0,6 m), multiplicado pela densidade do ar (1,225 kg/m<sup>3</sup>). Assim, o valor inicial do fluxo de massa foi 3,675kg/m<sup>3</sup>.

As condições de contorno estão apresentadas na Tabela 3: condição de entrada, um perfil de camada limite obtido a partir da simulação do domínio precursor; condição saída, gradiente normal nulo para todas as variáveis do escoamento, exceto para a pressão (*outflow*); superfície, topo do domínio e paredes laterais, condição de parede fixa sem deslizamento e barreira vegetal, condição de meio poroso para os casos apresentados na seção 4.1.1.

Tabela 3: Condições de contorno para o cenário com barreira vegetal.

| Localização no domínio      | Condição de contorno   |   |  |
|-----------------------------|--|---|--|
| Entrada                     | $u_1(z) = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ $u_2 = u_3 = 0$   | $\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \kappa^{3/2} / l$ | $\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ $\omega = \kappa^{1/2} / C_\mu^{1/4} l$ |
| Topo, laterais e superfície | $\overline{u_1} = \overline{u_2} = \overline{u_3} = 0$   |   |  |
| Saída                       | $\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1} = \frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_1} = \frac{\partial \overline{u_3}}{\partial x_1} = 0$ |   |  |

No experimento em túnel de vento não foi medido o valor do LAD das plantas utilizadas. Para a simulação numérica o valor do LAD foi determinado com base em estudos anteriores da literatura que mediram e/ou estimaram a densidade de área foliar de plantas com características morfológicas semelhantes. A densidade de área foliar para o intervalo

de  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  foi o que forneceu maior concordância com os dados experimentais, assim como foram os resultados com o maior número de trabalhos encontrados na literatura (BUCCOLIERI et al., 2018b; GROMKE et al., 2015; MORADPOUR; AFSHIN; FARHANIEH, 2017; SANTIAGO et al., 2017).

O coeficiente de arrasto foi adotado com base em estudos na literatura, no qual foi de 0,2 de coeficiente de arrasto ( $C_D$ ). A literatura apresenta valores de coeficiente de arrasto variam de 0,2 a 0,5 (BITOG et al., 2012; GUO; MAGHIRANG, 2012; TIWARY; MORVAN; COLLS, 2006), considerando 0,2 na maior parte dos estudos.

Assim, para condição de meio poroso utilizada na reprodução da vegetação, a equação de introdução do termo fonte/sumidouro na equação de movimento ( $S_{ui}$ ) foi utilizada adotando 0,2 de coeficiente de arrasto ( $C_D$ ), bem como  $LAD_{\text{máx}}$  de 0,5 e 1 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ). No presente trabalho os efeitos da turbulência originada do dossel da vegetação não foram contabilizados, assim  $S_k$  e  $S_\epsilon$  ou  $S_\omega$  é zero para todos os termos fonte/sumidouro que tratam a energia cinética turbulenta e a dissipação da energia cinética turbulenta pelos modelos de turbulência no dossel da vegetação (BUCCOLIERI et al., 2018b; JEANJEAN et al., 2017; LIU et al., 2018).

#### 4.2.3.2 Análise da similaridade

A similaridade é fundamental para validação dos estudos numéricos na comparação com dados experimentais. No presente trabalho, como forma de validar a simulação foram avaliadas a similaridade geométrica e dinâmica. A primeira mostra que as características da geometria no domínio computacional simulado são similares a geometria utilizada no experimental em túnel de vento, bem como estão em proporcionalidade com a escala real. Enquanto a segunda, similaridade dinâmica, mostra que as forças que age sobre o experimental foram representadas na simulação, permitindo que os resultados da simulação sejam comparados e válidos aos resultados do experimento em túnel de vento, ou seja, há uma representação física do fenômeno.

A abordagem relacionada à similaridade utilizada no presente estudo foi aplicada aos estudos desenvolvidos para a barreira natural vegetal. O coeficiente denominado de Densidade de Área Foliar (LAD) possui valores indicados na literatura para os diferentes tipos de árvores, folhas e copas. Estes valores são inicialmente válidos para árvores em

escala real encontrada em cinturões verdes, da ordem de 15 a 30 metros de altura. Simulações preliminares foram realizadas e comprovaram a validade dos coeficientes nesta escala para a predição da redução da velocidade do escoamento. Contudo, no experimento de túnel de vento utilizado para validação os modelos de espécie vegetal possuem aproximadamente 15 cm de altura.

Desta forma, foi necessário adaptar o coeficiente de resistência inercial (este dependente do LAD) para o volume de árvore utilizada no experimento de túnel de vento. A similaridade geométrica foi atingida pela manutenção das características e dimensões do experimento de túnel de vento e a relação de volume entre a escala real e de túnel de vento foi considerado no cálculo do coeficiente implementado na simulação numérica. Assim, o coeficiente de resistência inercial foi escalonado na proporção 200 vezes o valor real para que gradiente pressão calculado na camada limite atmosférica seja representativo e equivalente ao medido no experimento simulado computacionalmente.

A similaridade dinâmica foi realizada pela avaliação da força de resistência da vegetação expressa pela força de arrasto das espécies de plantas *C. bipinnatus* e *L. lucidum* (MIRI; DRAGOVICH; DONG, 2018).

A força de resistência é descrita por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A_{FP} \quad (65)$$

onde  $F_D$  é a força de arrasto ( $\text{kg.m/s}^2$ ),  $\rho$  densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $U$  é a velocidade média do escoamento ( $\text{m/s}$ ),  $C_D$  coeficiente de arrasto e  $A_{FP}$  área frontal projetada ( $\text{m}^2$ ).

A área frontal projetada ( $A_{FP}$ ) é influenciada pela velocidade do escoamento e afeta a capacidade de resistência da vegetação ao escoamento do vento conforme mostra a força de arrasto calculada no experimento em túnel de vento realizado por Miri, Dragovich e Dong (2018).

Assumindo o coeficiente de arrasto  $C_D = 1$  e que a área frontal projetada ( $A_{FP}$ ) varia em função da velocidade, os autores calcularam a força de arrasto. A área frontal projetada média foi de  $A_{FP}=0,0052\text{m}^2$  para  $U=4\text{m/s}$ , considerando uma perda de 40% para velocidade de  $12\text{m/s}$ , temos  $A_{FP} = 0,0031\text{m}^2$  e  $F_D=0,27\text{N}$  (MIRI; DRAGOVICH; DONG, 2018). Para o presente estudo, considerando a  $A_{FP}= 0,15 \times 0,10 = 0,015\text{m}^2$  (sem perda da

área frontal) e usando  $C_D=0,2$ ,  $LAD=1\text{m}^2/\text{m}^3$ , temos  $F_D=0,28\text{N}$ , entretanto, ainda que uma perda semelhante de 40% da  $A_{FP}$  seja considerada para simulação numérica, a força de arrasto calculada de  $0,33\text{N}$  está dentro da faixa medida no experimental que foi de  $0,27\text{N}$  a  $0,39\text{N}$  para velocidade de  $12\text{m/s}$ . Assim, a similaridade dinâmica é alcançada e os resultados da simulação podem ser comparados e validados usando dados experimentais de Miri et al. (2017).

#### 4.2.3.3 Cenário com barreira artificial porosa

A geometria foi construída com as seguintes dimensões:  $2,80\text{m}$  de comprimento,  $0,50\text{m}$  de largura e  $0,40\text{m}$  de altura. Na direção horizontal em  $x/H$  varia de  $-50$  a  $90$ , onde a barreira está posicionada em  $x=0$  (Figura 18). A distância de  $50H$  a montante e  $90H$  jusante da barreira são suficientes de forma que o escoamento de entrada não é afetado pela presença da barreira de vento, bem como a região de saída encontra-se a distância suficiente para o completo desenvolvimento do escoamento. A altura do domínio computacional variou de  $0 < z/H < 20$ .

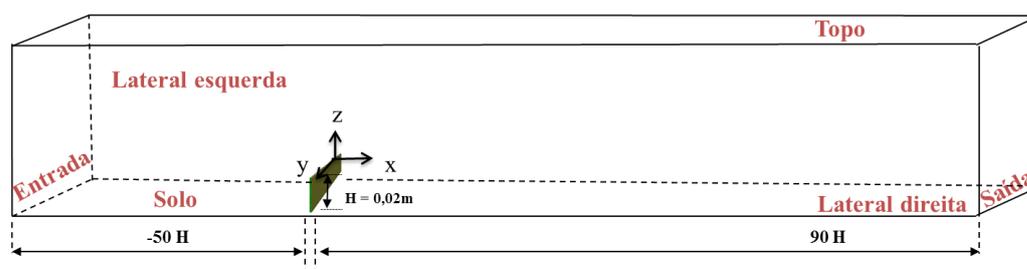


Figura 18: Esquema representativo do domínio computacional simulado da barreira artificial.

Assim, para a simulação numérica do escoamento em uma barreira de vento, um domínio computacional será construído de acordo com o experimento de túnel de vento realizado por Dong et al. (2007 e 2010).

Para determinação das condições de entrada, foi utilizado um domínio precursor com dimensões e características semelhantes as configurações do experimento de túnel de

vento de Dong et al. (2007 e 2010). Os resultados do domínio precursor forneceram as condições de velocidade e turbulência de entrada. Para o presente cenário, o fluxo de massa inicial foi calculado baseado na velocidade média de 8 m/s e na área de entrada do domínio computacional (0,5 m x 0,4 m), multiplicado pela densidade do ar (1,225 kg/m<sup>3</sup>). Assim, o valor inicial do fluxo de massa foi 1,96kg/m<sup>3</sup>.

Na Figura 19 é apresentado os perfis de velocidade e de energia cinética turbulenta obtidos pelo domínio precursor, os quais forneceram as condições de contorno de entrada nos casos da barreira de vento artificial. Observa-se um perfil logaritmo de velocidade na entrada de 10 m/s e condições de turbulência (intensidade da turbulência) semelhantes aos dados experimentais em túnel de vento (Figura 19), que foram obtidos em uma região a montante e fora da influência da barreira de vento.

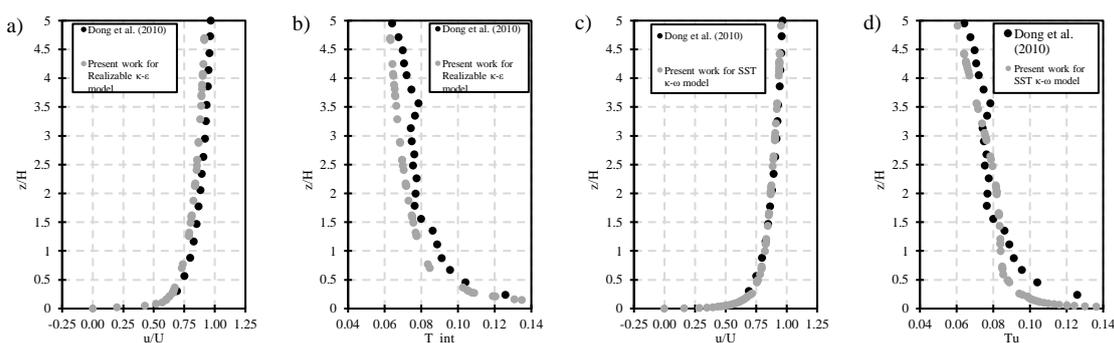


Figura 19: Comparação dos perfis de entrada de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura entre o experimental de Dong et. al (2010) e as simulações numéricas. (a) Velocidade e (b) Intensidade de turbulência obtidos pelo modelo de turbulência modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável; (c) Velocidade e (d) Intensidade da turbulência calculados com o modelo de turbulência o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST

Para redução do custo computacional, uma vez que o problema apresenta natureza simétrica, foi construído e simulado metade do domínio de estudo. Além disso, nas laterais e no topo foram empregadas a condição de contorno de simetria, onde é assumido que não há variação do escoamento na direção normal a superfície. Essa condição de contorno reduz a influência das paredes no escoamento, assim o comportamento do escoamento de ar medido no centro do domínio não é afetado pelas paredes.

As condições de contorno utilizadas na simulação numérica estão apresentadas na Tabela 4, as quais serão: condição de entrada, um perfil de camada limite obtido a partir de simulação do domínio precursor; condição de saída, gradiente normal nulo para todas as variáveis do escoamento, exceto para a pressão; solo e a barreira sólida, condição de parede fixa sem deslizamento; topo do domínio e paredes laterais, condição de simetria, cujo gradientes normais de velocidade são nulos e; barreira porosa (*windfence*), condição de meio poroso apresentadas na seção 4.1.2.2.

Tabela 4: Condições de contorno da simulação numérica do escoamento na barreira artificial

| Localização no domínio       | Condição de contorno   |   |  |
|------------------------------|--|---|--|
| Entrada                      | $u_1(z) = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ $u_2 = u_3 = 0$   | $\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \kappa^{3/2} / 1$ | $\kappa = \frac{1}{2}(\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ $\omega = \kappa^{1/2} / C_\mu^{1/4} 1$ |
| Superfície e barreira sólida | $\overline{u_1} = \overline{u_2} = \overline{u_3} = 0$   |   |  |
| Topo e laterais              | $\overline{u_2} = \frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_2} = \frac{\partial \overline{u_3}}{\partial x_2} = 0$                               |   |  |
| Saída                        | $\frac{\partial \overline{u_1}}{\partial x_1} = \frac{\partial \overline{u_2}}{\partial x_1} = \frac{\partial \overline{u_3}}{\partial x_1} = 0$ |   |  |

## 4.3 MÉTODO NUMÉRICO

### 4.3.1 Discretização das equações de transporte

As etapas de discretização do domínio computacional e das equações de transporte são mostradas na Figura 20.

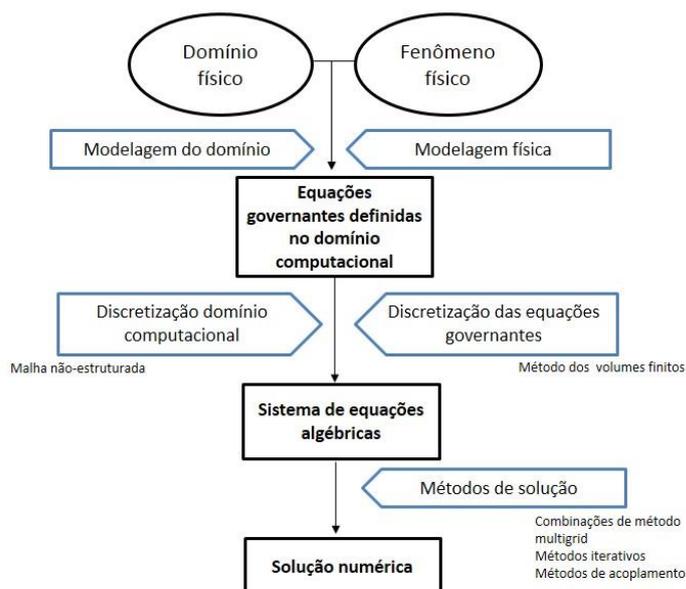


Figura 20: Fluxograma dos processos de discretização das equações de transporte em um domínio computacional. Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish, 2016.

A equação de conservação de uma propriedade  $\phi$ , de forma geral é escrita pela equação (66) (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Termo Transiente}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho U_i \phi)}{\partial x_i}}_{\text{Termo Convectivo}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right]}_{\text{Termo Difusivo}} + \underbrace{Q^\phi}_{\text{Termo Fonte}} \quad (66)$$

Considerando regime permanente, o primeiro termo da equação é desconsiderado e a equação (66) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial(\rho U_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right] + Q^\phi \quad (67)$$

onde  $\phi$  é uma variável escalar (fração mássica, temperatura, espécie química, energia cinética turbulenta, etc),  $Q^\phi$  é a geração de  $\phi$  por unidade de volume dentro do domínio e  $\Gamma^\phi$  é o coeficiente de difusão característico da propriedade transportada

As equações de conservação descritas no item 4.2 serão solucionadas empregando o software comercial Ansys Fluent versão 19.0 que resolve as equações baseado no método dos volumes finitos (MFV). O MFV é baseado no princípio de conservação das propriedades do escoamento em volumes de controle elementares usados para discretizar

o domínio computacional. Assim, são obtidas equações de conservação algébricas, nas quais representam de forma discreta a equação diferencial contínua que se deseja resolver (MALISKA, 2004).

A Figura 21 mostra a representação da discretização do domínio computacional 1D em volumes de controle. Os pontos F1, F2, F3, F4, F5, F6 e C identificados na Figura 21, correspondem aos pontos centrais de cada célula, onde as equações de transporte são resolvidas.

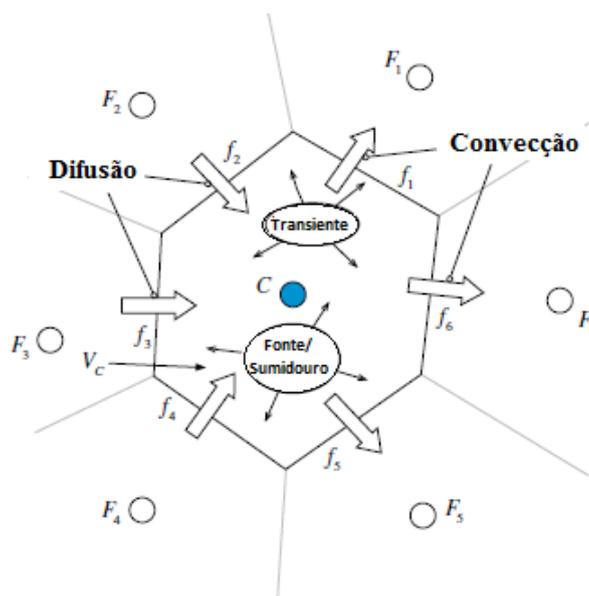


Figura 21: Representação de discretização do volume de controle no domínio computacional em 1D. Adaptado de Moukalled; Mangani e Darwish, 2016.

Para discretização das equações de transporte, a equação (66) é integrada sobre o volume de controle. Assim, temos a seguinte equação:

$$\int_{V_c} \frac{\partial(\rho U_i \phi)}{\partial x_i} dV = \int_{V_c} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right] dV + \int_{V_c} Q_C^\phi dV \quad (68)$$

Aplicando o teorema do divergente (teorema de Gauss), as integrais de volume são substituídas por integrais de superfície nos termos de convecção e difusão. Assim, a equação (68) torna-se:

$$\int_f (\rho U_i \phi) \cdot n dS = \int_f \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \cdot n dS + \int_{V_c} Q_C^\phi dV \quad (69)$$

onde  $n$  é o vetor normal a superfície,  $(\cdot)$  o operador de produto escalar,  $S$  é o vetor da secção transversal da superfície,  $dS$  o infinitesimal da área da secção transversal da superfície,  $U_i$  a componente do vetor velocidade na direção  $i$ ,  $\phi$  a quantidade conservada e  $f$  representa o ponto de integração no centroide da face de contorno.  $\int_f$  a integral da superfície da face (área) do volume de controle ( $V_C$ ).

Seguindo a aproximação de integração do ponto médio, a equação do volume finito em regime permanente, semi-discreto para o elemento  $C$  pode ser expresso como a soma dos fluxos de convecção e difusão. Assim, o fluxo total no elemento  $C$  pode ser descrito de forma simplificada como:

$$\sum_{f \sim nb(C)} \left( \rho U_i \phi - \left( \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right)_f \cdot S_f = Q_C^\phi V_C \quad (70)$$

Na Figura 22 é apresentado o esquema de discretização da malha de um domínio hipotético. A geometria foi dividida em 5 volumes de controle iguais, cujo pontos nodais estão localizados no centro de cada célula.  $W$  e  $E$  são os pontos nodais a esquerda ( $W$ ) e direita ( $E$ ) do ponto  $C$  e as faces do volume de controle estão posicionadas no ponto médio entre os nós. As distâncias entre  $W$  e  $C$  e  $C$  e  $E$  são respectivamente  $\delta x_w$  e  $\delta x_e$ . O tamanho do volume de controle é indicado por  $\Delta x_c$  na direção de  $x$  e  $\Delta y_c$  na direção de  $y$ . Os pontos  $w$  e  $e$  indicam as faces a esquerda ( $w$ ) e direita ( $e$ ) do ponto  $C$  e as superfícies das faces são expressas por  $S_e$  e  $S_w$  (Figura 22 (b))

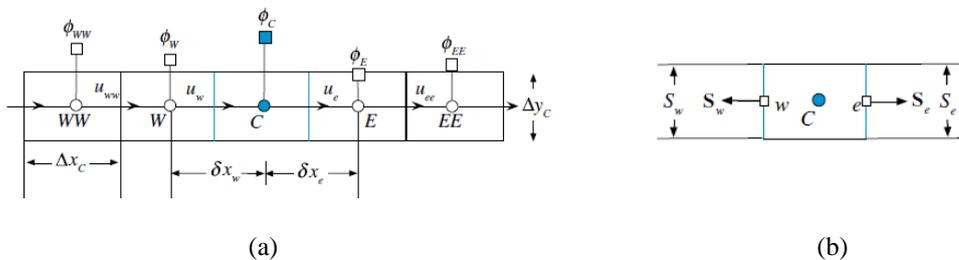


Figura 22: Esquema de transporte de uma variável ao longo do volume de controle. Adaptado de Moukalled; Mangani e Darwish, 2016

A etapa de discretização da equação é realizada sobre cada volume de controle do domínio computacional para formar uma relação algébrica que conecta o valor de uma variável em um elemento aos valores da variável nos elementos adjacentes (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

A discretização das equações no ponto nodal  $C$  é obtido através da aplicação da equação (70) no volume de controle, como mostrado na equação a seguir:

$$(\rho U_i \phi)_e . S_e - (\rho U_i \phi)_w . S_w = \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)_e . S_e - \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)_w . S_w + Q_C^\phi V_c \quad (71)$$

Os termos a esquerda da igualdade são termos convectivos ou advectivos, na segunda parte da equação estão os termos difusivos (primeiro e segundo) e o termo fonte/sumidouro que governa a produção ou destruição da propriedade dentro do volume de controle. Em alguns casos, o termo fonte  $Q_C^\phi$  pode ser uma função da variável dependente. Nesses casos, o método de volume finito promove a linearização do termo:

$$Q_C^\phi = Q(\phi_C) \quad (72)$$

$$Q_C^\phi V_c = Q(\phi_C) + Q_C \quad (73)$$

Os termos fonte (sumidouro e fonte) afetam não apenas a física do problema, mas também a estabilidade numérica dos cálculos, pois se não tratados adequadamente podem resultar em problemas de convergência (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). Uma estratégia comumente usada para promover a convergência é relaxação dos coeficientes por meio do método de relaxamento.

O procedimento de discretização gera um conjunto de equações algébricas a ser resolvido por um algoritmo de solução de sistemas lineares. O conjunto de equações lineares que surgem a partir da aplicação do método dos volumes finitos, para cada volume de controle do domínio, são equações de conservação na forma discreta expressas como:

$$\sum A\phi = b \quad (74)$$

$$a_C \phi_C + \sum_{F \sim NB(C)} a_F \phi_F = b_C \quad (75)$$

O resultado do processo de discretização é um sistema de equações lineares da forma  $A\phi = b$  onde as incógnitas  $\phi$ , localizadas nos centróides dos elementos da malha, são os valores procurados. Nesse sistema, os coeficientes das variáveis desconhecidas que constituem a matriz  $A$  são o resultado do procedimento de linearização e da geometria da malha, enquanto o vetor  $b$  contém todas as fontes, constantes, condições de contorno e componentes não linearizáveis.

Os detalhes da geometria das malhas utilizadas neste trabalho bem como os testes de sensibilidade estão descritos no Apêndice I.

#### **4.3.2 Solução do sistema algébrico de equações**

O sistema de equações algébrica pode ser resolvido por diferentes métodos de solução (métodos diretos e iterativos). Como problemas de escoamento de fluido são altamente não lineares e os coeficientes resultantes do processo de linearização geralmente são dependentes da solução, os métodos iterativos são apontados como mais adequados para solução das equações neste tipo de estudo. Outro fator importante é o seu o baixo custo computacional e de armazenamento em relação aos métodos diretos (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

Os métodos iterativos seguem um procedimento de solução inicial e correção para refinar gradualmente a solução estimada resolvendo repetidamente o sistema discreto de equações até a convergência da solução. Para isso, a solução deve atender critérios de convergência pré-estabelecidos.

O Software Fluent utiliza o método iterativo Gauss-Seidel para resolução das equações do sistema linear. O método de Gauss-Seidel, apresenta boas características de convergência, além menor custo de armazenamento de memória. No entanto, a taxa de convergência da solução reduz à medida que o sistema linear de equações aumenta, o que aumenta o tempo de processamento e o custo computacional. Para resolver essa deficiência são utilizados métodos de aceleração da convergência. Eles melhoram a eficiência dos solucionadores iterativos (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

### 4.3.3 Esquema de interpolação das variáveis no volume de controle

A discretização dos gradientes é fundamental para formação do conjunto de equações de ambos termos, difusão e convecção. Duas abordagens podem ser usadas para calcular  $\phi$ , sendo uma baseada na face e a outra no vértice do volume de controle. No estudo, o Least Squares Cell-Based foi utilizado, pois apresenta o menor custo computacional quando comparado aos demais (ANSYS, 2013).

Os gradientes são calculados nos principais pontos da malha e os valores nas interfaces são obtidos por interpolação. Os fluxos difusivos em escoamentos turbulentos são não uniformes e a representação dessa variação ao longo dos pontos nodais é necessária. Dessa forma, o transporte de  $\phi$  entre as faces é calculado por métodos de interpolação, cuja uma simples abordagem é considerar uma distribuição de perfil linear entre os pontos.

O esquema de interpolação *Upwind* tem sido amplamente usado em estudos CFD devido a sua simplicidade. O emprego do método *Upwind* confere um esquema de discretização muito estável e que obedece ao requisito de transportabilidade, contudo, a precisão dos métodos de primeira ordem pode causar, em alguns casos, uma falsa difusão devido a erros numéricos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Assim sendo, esquema de ordem superior utilizam um número maior de pontos e reduzem os erros de discretização, por esse motivo o método *Upwind* de segunda ordem foi utilizado para a discretização dos fluxos convectivos-difusivos.

### 4.3.4 Acoplamento pressão-velocidade

Outro ponto é que o campo de velocidades é extremamente dependente do campo de pressão, que é desconhecido. A estratégia de solução iterativa utilizada é o método de acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC (*Semi-Implicit Method For Pressure-Linked Equations Consistent*), proposto por Van Doormal e Raithby (1984). O SIMPLEC é uma modificação do algoritmo SIMPLE desenvolvido por Patankar (1980) onde as inconsistências das equações de correção das velocidades foram parcialmente removidas, eliminando-se a necessidade do fator de relaxação da pressão e obtendo melhoras consideráveis na taxa de convergência do método (HONOTORIO, 2013).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados do escoamento modificado por diferentes tipos de barreiras de vento (naturais e artificiais), simulados numericamente no presente estudo, conforme indicado na Seção 4.1. O objetivo principal consistiu em modelar matematicamente o comportamento do escoamento a fim de analisar sua influência na redução da velocidade do escoamento e na formação da região de abrigo. Para tanto, foram investigadas diferentes formulações para implementação da barreira de vento (vegetal, artificial sólida e artificial porosa), além de diferentes modelos de turbulência. Foi, ainda, analisada a sensibilidade do campo de vento e da turbulência aos parâmetros morfológicos das barreiras vegetais e a porosidade das barreiras artificiais. Os resultados das simulações foram comparados a estudos experimentais em escala de laboratório publicados na literatura científica recente para validação das modelagens propostas. A resposta da distribuição da velocidade de fricção em função das modificações no escoamento geradas por diferentes implementações e métodos utilizados na modelagem de barreiras de vento foi avaliada no presente estudo.

### 5.1 ESCOAMENTO EM BARREIRAS DE VENTO NATURAIS

#### 5.1.1 Análise comparativa dos modelos de turbulência

Equações distintas empregadas para tratar variáveis que modelam a turbulência em cada modelo podem gerar modificações nos resultados da distribuição da velocidade e da energia cinética turbulenta ao redor da barreira de vento (SANTIAGO et al., 2007).

Na literatura, as limitações dos modelos na modelagem do escoamento em meio poroso como barreira vegetais são raramente apresentadas. A avaliação da variação dos resultados do escoamento para diferentes modelos de turbulência é importante na determinação da influência desses na modelagem do escoamento, principalmente para a obtenção velocidade do vento.

Para avaliar a influência dos modelos de turbulência na predição do escoamento em barreira de vento vegetal, conforme descrito na Seção 4.2, os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST foram utilizados, e 52 casos diferentes foram analisados. Os casos foram simulados para dois valores de  $C_i$  diferentes, modelados considerando a variação da densidade de área foliar e sua distribuição vertical descrita utilizando a

equação de Lalic e Mihailovic (2004). Os casos apresentados na Figura 23 estão descritos detalhadamente na Tabela 1, onde são apresentadas as características morfológicas avaliadas no presente trabalho. Os resultados dessas análises serão apresentados nas seções posteriores.

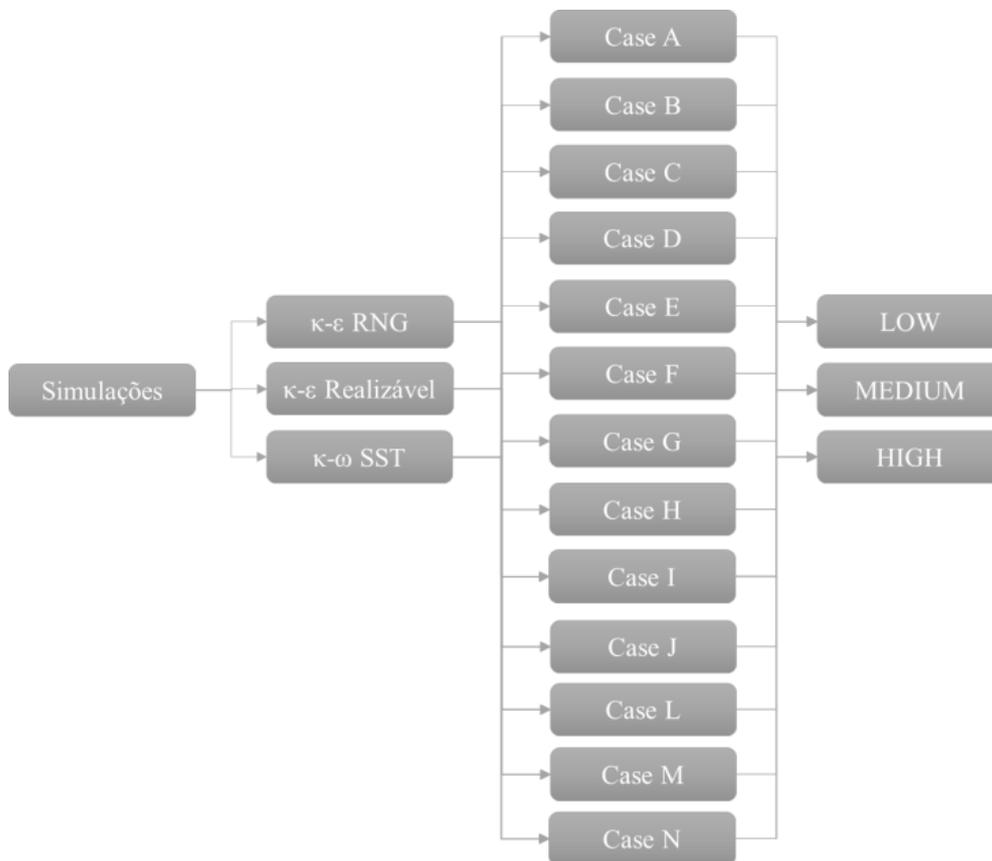


Figura 23: Fluxograma de descrição dos casos, modelagem da turbulência utilizados no presente estudo em barreiras de vento naturais.

Inicialmente, será apresentada a análise da performance dos modelos de turbulência ( $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST) relativamente à predição da redução da velocidade do escoamento, variando-se o coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ), considerando a distribuição vertical de LAD proposta por Lalic e Mihailovic (2004) para o cenário  $LAD_{max} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $N = 2$  e  $H_{máx} = 95\%$  (Caso I da Tabela 1). Posteriormente, será analisada a influência da  $LAD_{max}$  e dos valores de  $N$  e  $H_{máx}$  no coeficiente de resistência inercial, calculado como  $C_i = LAD * C_D$ , o produto do coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) pela densidade de área foliar.

Na Figura 24, um gráfico esquemático do domínio computacional simulado é apresentado, onde são destacadas as linhas de medição dos perfis horizontais e verticais. Os perfis horizontais foram medidos nas posições de  $z/H=0,8$  (apresentado na Figura 24 em I) e na altura do topo da vegetação em  $z/H=1$  (Figura 24II). Os perfis verticais foram obtidos em  $x/H=6.6$  (Figura 24III) e  $x/H=12$  (Figura 24IV).

A Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27 mostram os resultados do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  para o cenário  $LAD_{max} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $N = 2$  e  $H_{max} = 95\%$  considerando a distribuição vertical de LAD conforme proposto por Lalic e Mihailovic (2004) (Caso I da Tabela 1) e diferentes densidades de área plantada: baixa, média e alta (Figura 12) para as espécies *C. bipinnatus* e *L. lucidum*.

São apresentados os perfis horizontais nas posições verticais  $z/H = 0,8$  e  $z/H = 1$  e os perfis verticais nas posições longitudinais  $x/H = 6,6$  e  $x/H = 12$ , obtidos na presente simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et al. (2017). A morfologia da vegetação foi modelada utilizando a distribuição vertical de  $LAD_{max}$  dada pela equação (13). O coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  é calculado pela equação (76) (CORNELIS; GABRIELS, 2005):

$$R(x,z) = 1 - \left( \frac{u(x,z)}{u_0(x,z)} \right) \quad (76)$$

onde  $x$  é a distância longitudinal,  $z$  é a altura acima da superfície,  $u(x,z)$  é a velocidade média do vento modificada pela barreira de vento (m/s) e  $u_0(x,z)$  é a velocidade média do vento não perturbada e a montante da barreira (m/s).

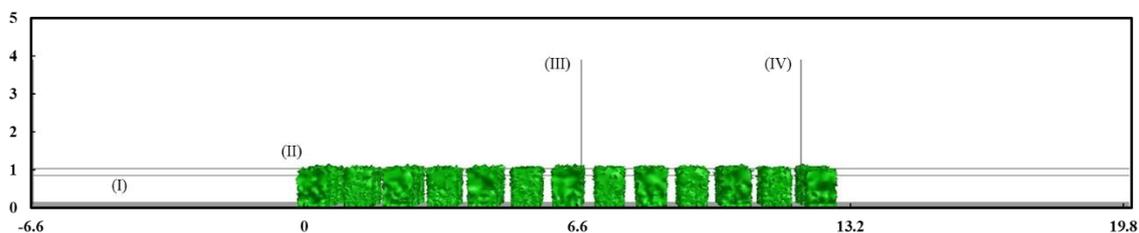


Figura 24: Linhas para obtenção dos perfis do coeficiente adimensional de redução da velocidade ao longo da horizontal nas posições de (I)  $z/H=0,8$  e (II)  $z/H=1$  e na vertical nas posições de (III)  $x/H=6,6$  e (IV)  $x/H=12$ .

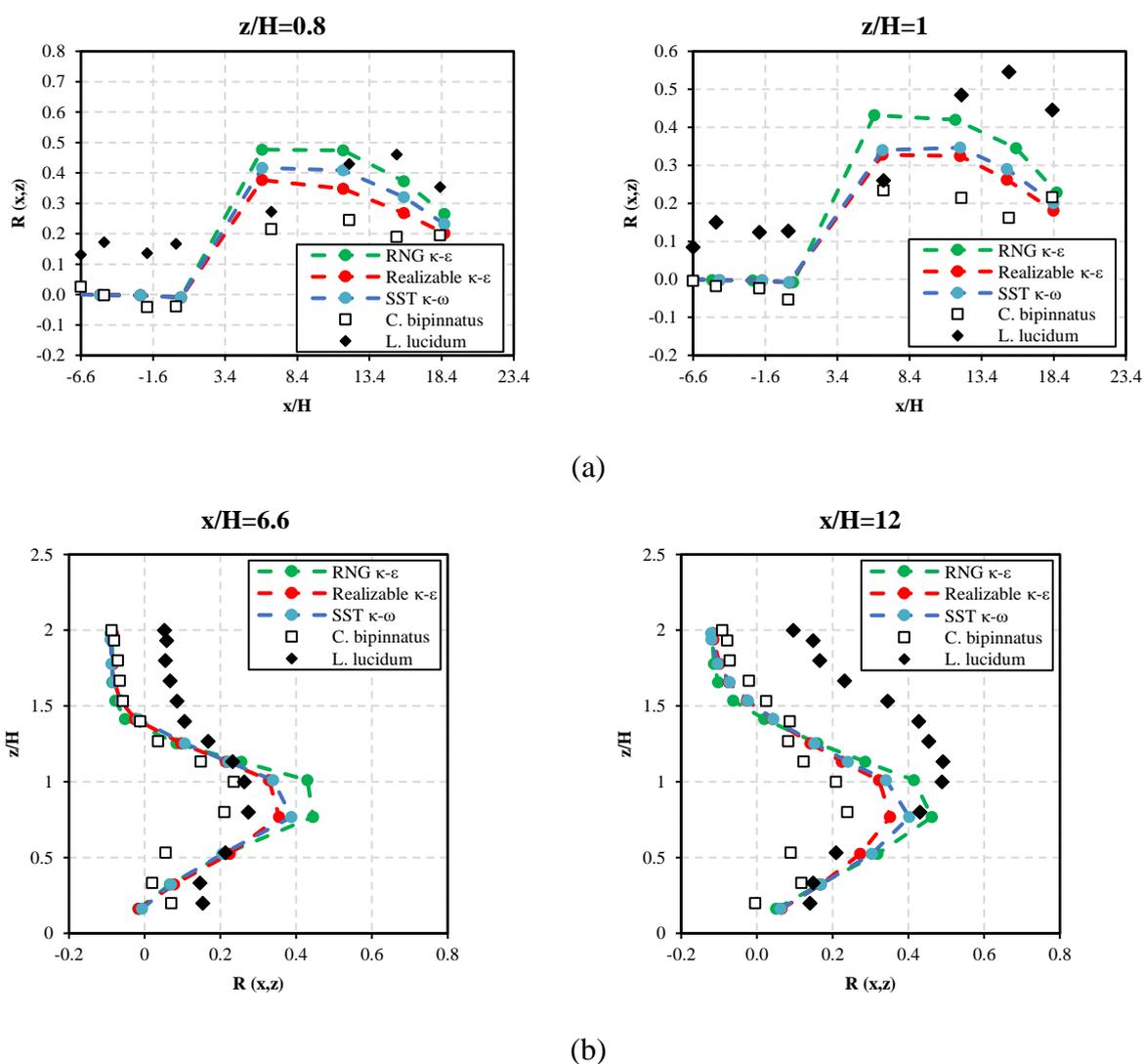


Figura 25: (a) Perfis horizontais nas posições verticais  $z/H = 0,8$  e  $z/H = 1$  e (b) perfis verticais nas posições longitudinais  $x/H = 6,6$  e  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et al. (2017) para baixa densidade de barreira.

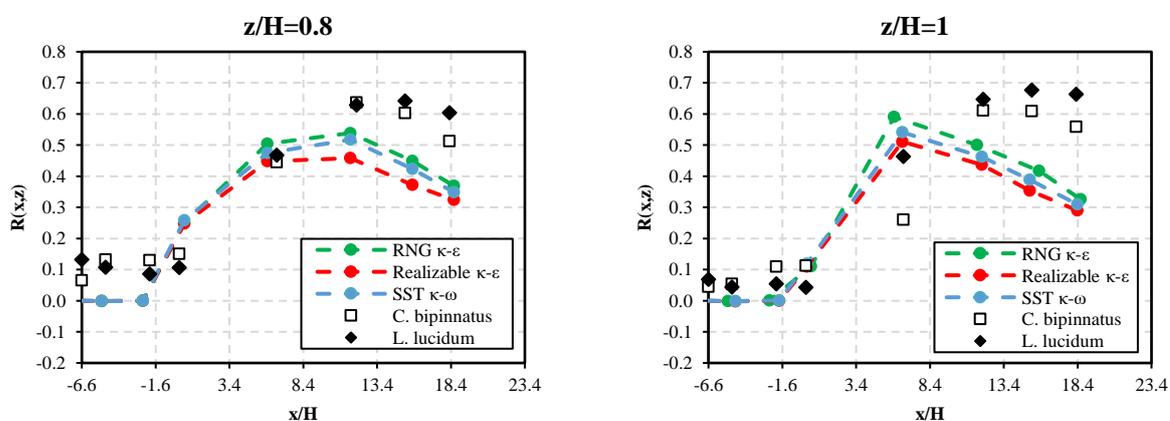
Para baixa densidade de barreira, os resultados da simulação mostram que o escoamento ao incidir na barreira sofre uma redução expressiva (superior a dos experimentos), comportamento observado também na parte final e na esteira da barreira de vento. Outro ponto a destacar é que os modelos tiveram dificuldade em prever o ponto máximo do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$ . Porém, a predição dos modelos apresenta ajuste satisfatório, a considerar a diferença dos dados experimentais entre as espécies simuladas e a tendência do comportamento do escoamento.

O perfil vertical do coeficiente adimensional de redução de velocidade  $R(x,z)$  apresenta forte redução da velocidade em toda região do dossel, superestimando sua redução em

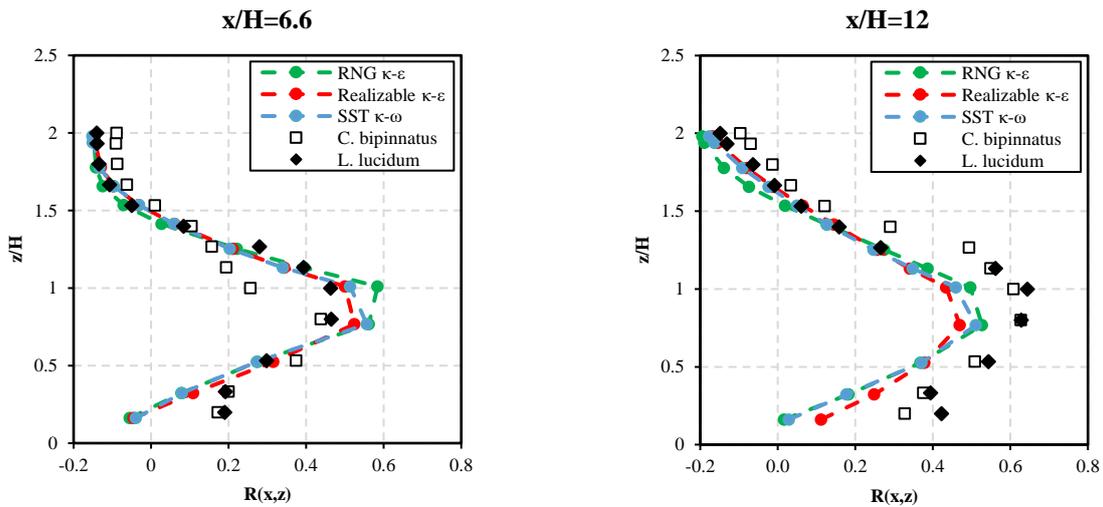
vários pontos ao longo da altura das árvores, especialmente na região próxima ao topo da vegetação ( $0,5 \leq z/H \leq 1$ ).

Além disso, outro fato que pode explicar a diferença entre os resultados é relacionado a variação da área frontal da vegetação. Segundo Miri, Dragovich e Dong (2018), as plantas, quando expostas a ventos com velocidade superior a 4 m/s, sofrem modificações de suas características aerodinâmicas, como a redução de sua área frontal. Isso afeta os níveis de resistência imposta pela vegetação ao escoamento e, como consequência, podem alterar a redução da velocidade gerada por ela no escoamento do vento. Os autores verificaram que a diminuição da área frontal levou a menor redução da velocidade a jusante das plantas, sendo que esse efeito aumenta à medida que a velocidade de entrada do túnel de vento é maior.

É importante destacar que a variação da área frontal da vegetação não é considerada na presente simulação numérica, que, por não apresentar esse efeito, levou a superestimação da redução da velocidade nos perfis horizontais e verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  pelos modelos de turbulência. A diferença entre os resultados preditos pelos modelos de turbulência e o experimental foi significativa. Considerando a média dos resultados experimentais entre as duas diferentes espécies usadas no estudo, a predição dos resultados do coeficiente adimensional de redução de velocidade  $R(x,z)$  apresentou para densidade baixa uma diferença de 83%, 58% e 46% para os respectivos modelos,  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG,  $\kappa$ - $\omega$  SST e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável.

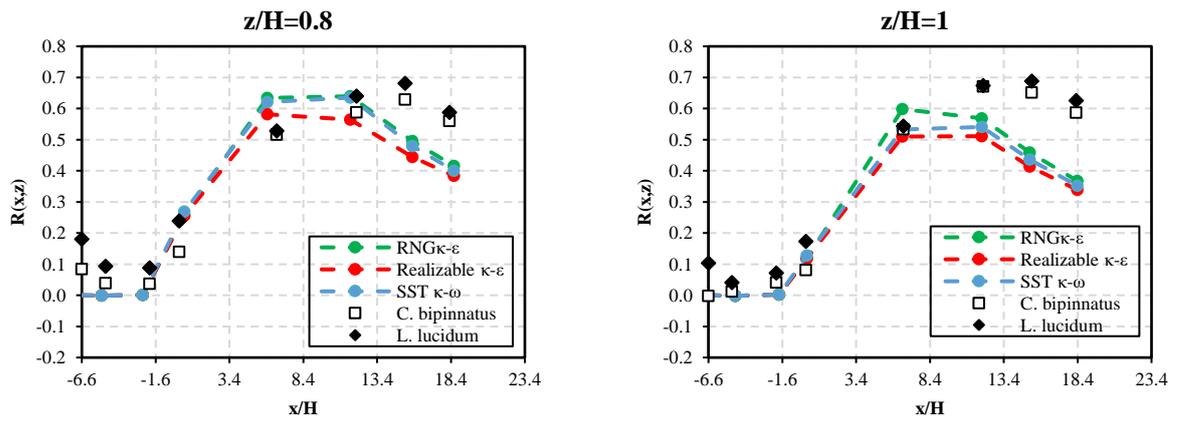


(a)

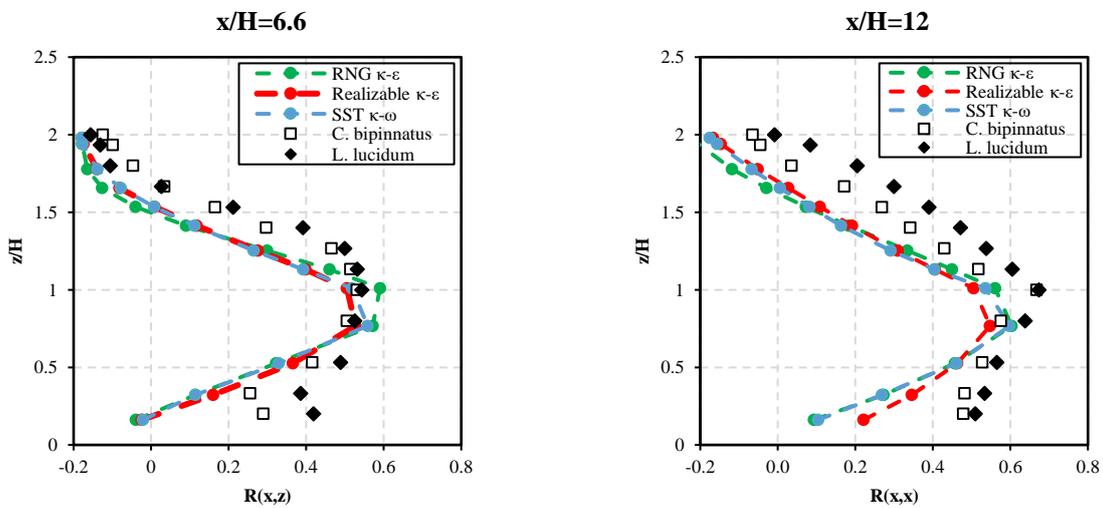


(b)

Figura 26: (a) Perfis horizontais nas posições verticais  $z/H = 0,8$  e  $z/H = 1$  e (b) perfis verticais nas posições longitudinais  $x/H = 6,6$  e  $x/H = 12$ , obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et. al (2017) para média densidade de barreira.



(a)



(b)

Figura 27: (a) Perfis horizontais nas posições verticais  $z/H = 0,8$  e (b)  $z/H = 1$  e (b) perfis verticais nas posições longitudinais  $x/H = 6,6$  e  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência e nos experimentos de Miri et. al (2017) para alta densidade de barreira.

É possível perceber que, considerando as 3 densidades, os modelos de turbulência apresentam resultados mais próximos no caso da barreira de alta densidade. Observa-se que, os valores de  $C_i$  apresentam maior influência, à medida que a densidade da barreira diminui.

Os modelos ajustam melhor aos dados experimentais na região a montante e no interior da barreira para menores valores de  $x$ . À medida que  $x$  aumenta, os modelos apresentam dificuldade na predição do escoamento dentro da barreira, assim como na esteira. Essa dificuldade é maior à medida que a influência da resistência provocada pela barreira diminui, na esteira afastada. Resultado análogo foi encontrado por Liu et. al. (2018), onde observou-se maior dificuldade da predição do escoamento próximo à vegetação e essa diminuiu à medida que  $x$  aumentou, sendo portanto, maior precisão a longas distâncias. O principal fato indicado para essa dificuldade é apontado pelos autores como sendo a utilização do coeficiente de resistência inercial uniforme, ou seja, igual ao longo da altura. A influência da implementação do perfil vertical da variação do coeficiente de resistência  $C_i$  será discutido com mais detalhes nas próximas seções.

Os perfis verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  apresentaram tendências semelhantes no comportamento quando comparados aos medidos no experimental, onde a maior redução da velocidade ocorreu próximo ao topo da vegetação entre  $0,8$  e  $1 z/H$ .

É possível perceber que os modelos SST e Realizável apresentam resultados mais próximos para menores valores de  $x$ . À medida que  $x$  aumenta, os resultados do modelo SST se aproximam dos resultados do RNG. A diferença entre os modelos é maior na barreira e diminui à medida que se afasta em  $x$ , tendendo há valores semelhantes na esteira afastada ( $x/H=18,4$ ). É possível perceber ainda que a maior diferença dos modelos é observada no dossel da vegetação ( $0,6 < z/H < 1,0$ ), próximo a altura do valor máximo de  $C_i$ .

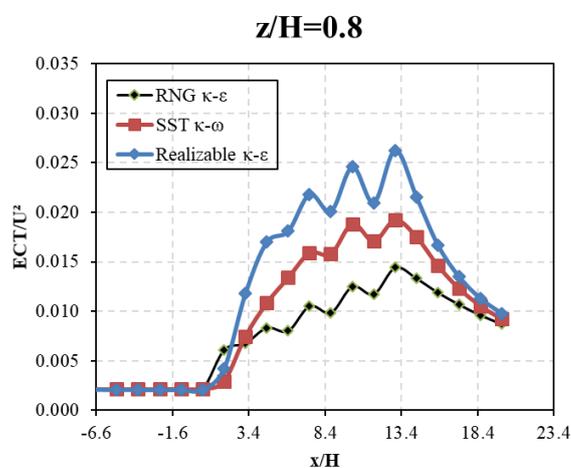
O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, destacando seu bom resultado na predição do escoamento dentro da barreira. Entretanto, na esteira, este foi que mais subestimou os resultados do coeficiente de redução  $R(x,z)$ . O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG apresentou os maiores valores do coeficiente de  $R(x,z)$ , demonstrando a maior redução da velocidade na predição do escoamento. Esse modelo apresenta uma correção no cálculo da produção de energia cinética turbulenta. Essa modificação no modelo RNG corrige a superestimação da energia cinética turbulenta presente no  $\kappa$ - $\varepsilon$  padrão. Isso pode alterar os resultados preditos do escoamento e resultar na velocidade menor no escoamento médio.

O objetivo de testar diferentes modelos de turbulência foi avaliar a capacidade de previsão do escoamento na vizinhança das árvores, assim como o seu resultado na estimativa da velocidade de fricção. Assim, foram testados os modelos que utilizam função de parede para o tratamento da turbulência próximo aos contornos sólidos e o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST que modelam o escoamento sem a utilização de funções de parede. Além disso, o objetivo foi avaliar o nível de influência que os diferentes modelos resultariam na predição do escoamento, visto que estes modelos foram utilizados na literatura em estudos semelhantes.

A partir dos resultados numéricos, é possível dizer que a mudança do modelo de turbulência não resultou em significativas modificações do comportamento do perfil do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$ , no entanto, a magnitude entre eles apresentou um percentual de diferença que variou ao longo dos perfis medidos. Essa diferença foi de 3% a 13% entre os modelos para densidades média e alta (espaçamento de 1,33H e 0,70H). Para densidade menor (2,00H), a diferença foi ainda maior, chegando a 34% no ponto máximo do coeficiente  $R(x,z)$  em  $z/H=0.8$ . Assim, o resultado médio da diferença entre os modelos de turbulência mostra que há uma variação percentual de aproximadamente 12%, principalmente entre os resultados do RNG e Realizável. É importante destacar a variação no modelo SST, pois observa-se que dentro da barreira seu resultado é próximo ao RNG, enquanto acima da vegetação (em  $z$ ) e distante da barreira (em  $x$ ) ele tende a concordar mais com o Realizável.

Os modelos apresentam menores valores de  $R(x,z)$  na camada de escoamento acima da vegetação. Este resultado pode estar relacionado com a descrição das equações utilizadas

para modelagem as propriedades do escoamento realizada pelos modelos de turbulência (GUO; MAGHIRANG, 2012; SANTIAGO et al., 2007). Correções como a realizada no RNG alteram a produção e dissipação da turbulência em regiões como o dossel da vegetação. A copa das árvores aumenta o atrito no escoamento, levando ao aumento da ECT, uma vez que, age como um obstáculo. A alta produção de ECT pode levar a forte dissipação da energia no escoamento, de forma a manter o balanço das propriedades transportadas. Assim, o escoamento passa pelo dossel e sofre um incremento de ECT que é dissipada rapidamente na região de esteira (Figura 28). A medida que o escoamento se afasta da barreira, essa reduz sua influência e a energia cinética turbulenta é dissipada, uma vez que, não há fonte para conservar a formação da turbulência e produção de ECT. A Figura 28 mostra a distribuição da energia cinética turbulenta considerando diferentes modelos de turbulência para o escoamento de vento para o Caso I em três diferentes densidades.



(a)

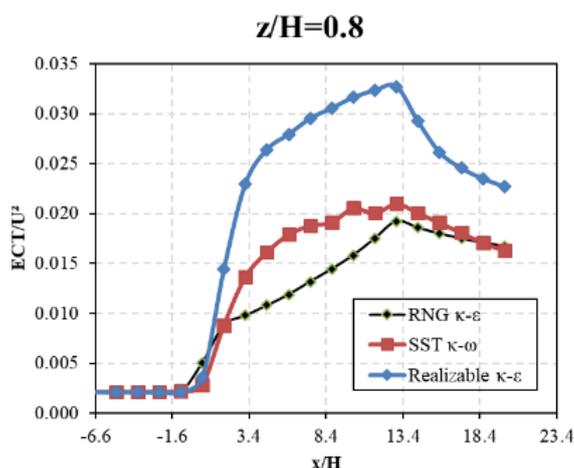
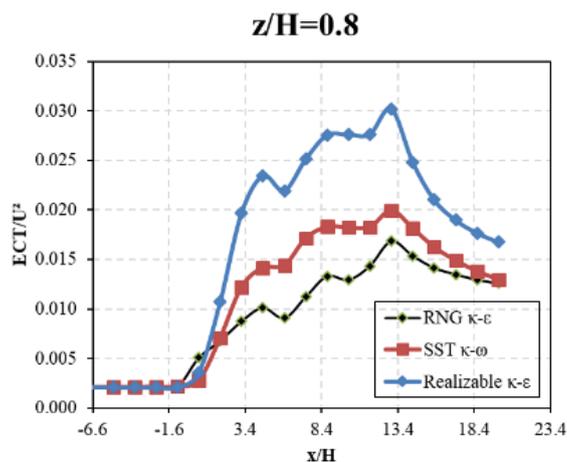


Figura 28: Perfis horizontais de energia cinética turbulenta nas posições verticais  $z/H = 0,8$  obtidos na simulação numérica usando diferentes modelos de turbulência para: (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira.

### 5.1.2 Análise da influência da densidade de área foliar (LAD) no coeficiente de resistência inercial

Dois diferentes valores de  $LAD_{máx}$  foram usados para investigar sua influência sobre o coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ). Na Figura 29, Figura 30 e Figura 31 são apresentados os resultados do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  obtidos para diferentes valores de  $LAD_{máx}$  ( $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) para  $N=2$  e  $H_{máx}=95\%$  e  $C_D 0,2$ .

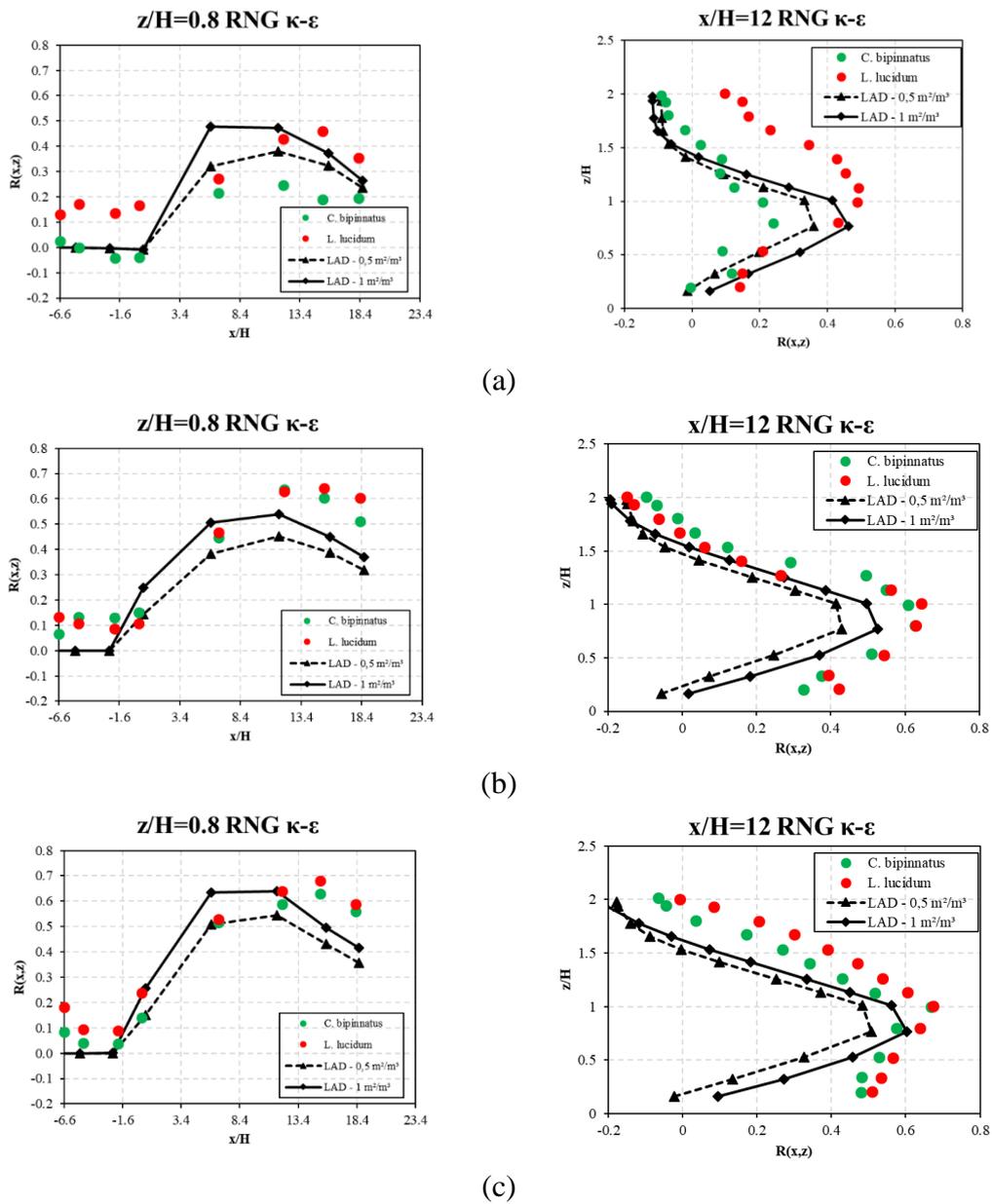
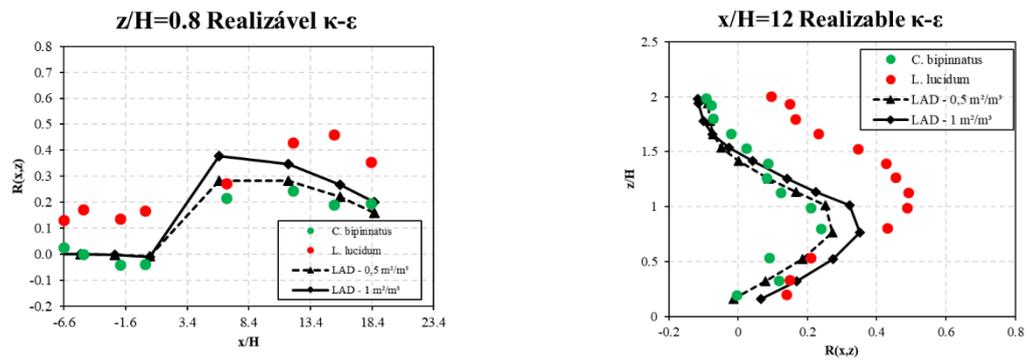
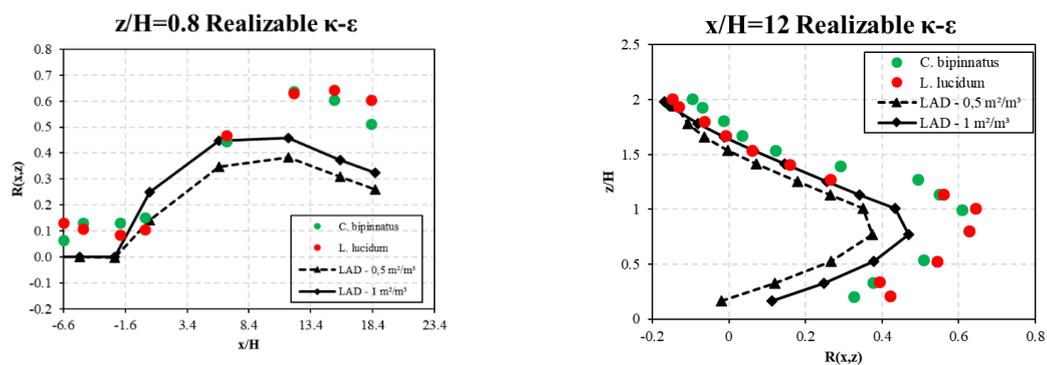


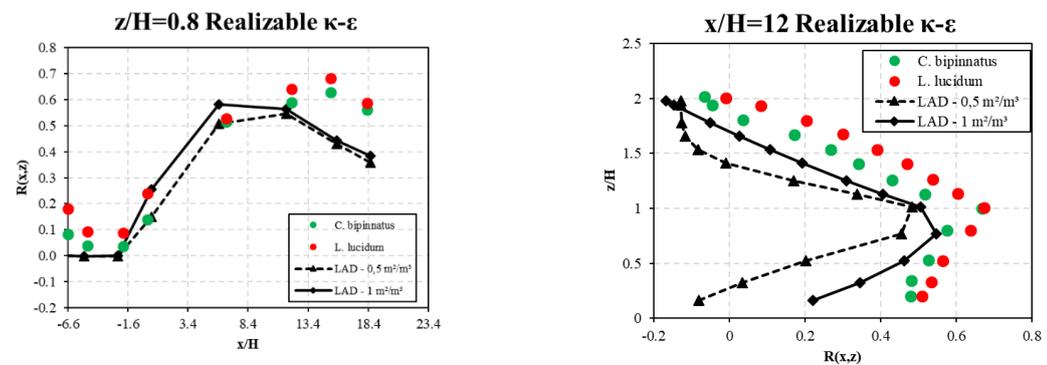
Figura 29: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa\text{-}\epsilon$  RNG com valores de  $LAD_{\text{máx}}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira.



(a)



(b)



(c)

Figura 30: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável com valores de  $LAD_{\text{máx}}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^3/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira.

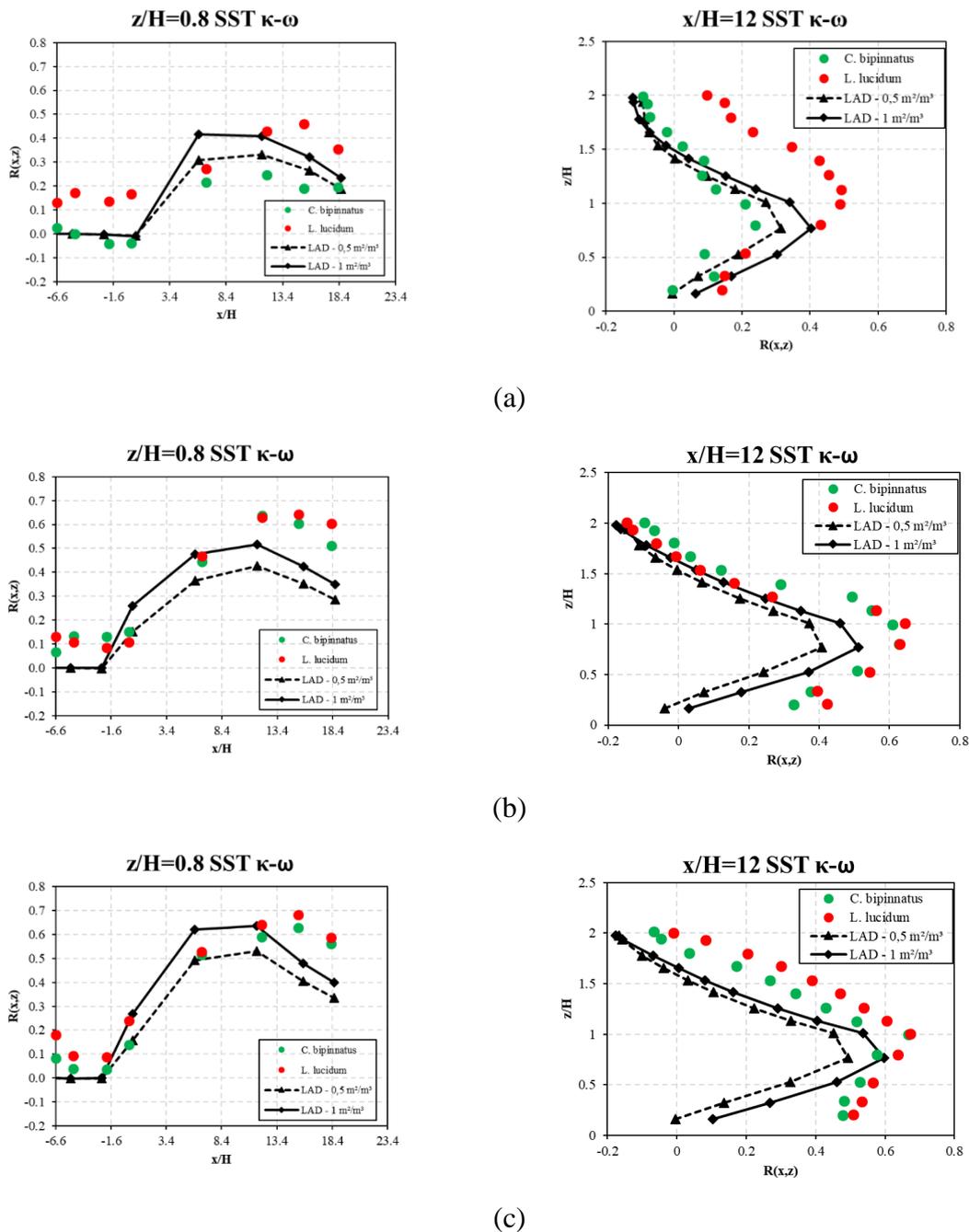


Figura 31: Perfis horizontais na posição vertical  $z/H = 0,8$  e perfis verticais na posição longitudinal  $x/H = 12$  obtidos na simulação numérica usando modelo  $\kappa\text{-}\omega$  SST com valores de  $LAD_{max}$  iguais a  $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e nos experimentos de Miri et al. (2017) para (a) baixa, (b) média e (c) alta densidade de barreira.

A variação do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  apresentou tendência semelhante para valores diferentes de  $LAD_{max}$  utilizados na modelagem da vegetação em todas as densidades simuladas. Apesar do comportamento semelhante, observou-se variação média de 28% entre eles. Na região do dossel são encontradas as

maiores variações (38%, 35% e 48%, para baixa, média e alta densidades respectivamente), especialmente próximo ao ponto de máximo valor de LAD ( $H_{\text{máx}}$ ), como pode ser visto no perfil vertical no intervalo de  $0,5 < z/H < 0,9$ .

No plano horizontal, observa-se que os efeitos da mudança do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) são mantidos a jusante da barreira na região de esteira, porém com diferença menor diferença à medida que se afasta em  $x$  da barreira. Os resultados mostraram que a variação do valor do coeficiente de resistência inercial não resultou em significativa influência na redução da velocidade na região de esteira, pois o percentual de redução da velocidade permaneceu em aproximadamente 25%.

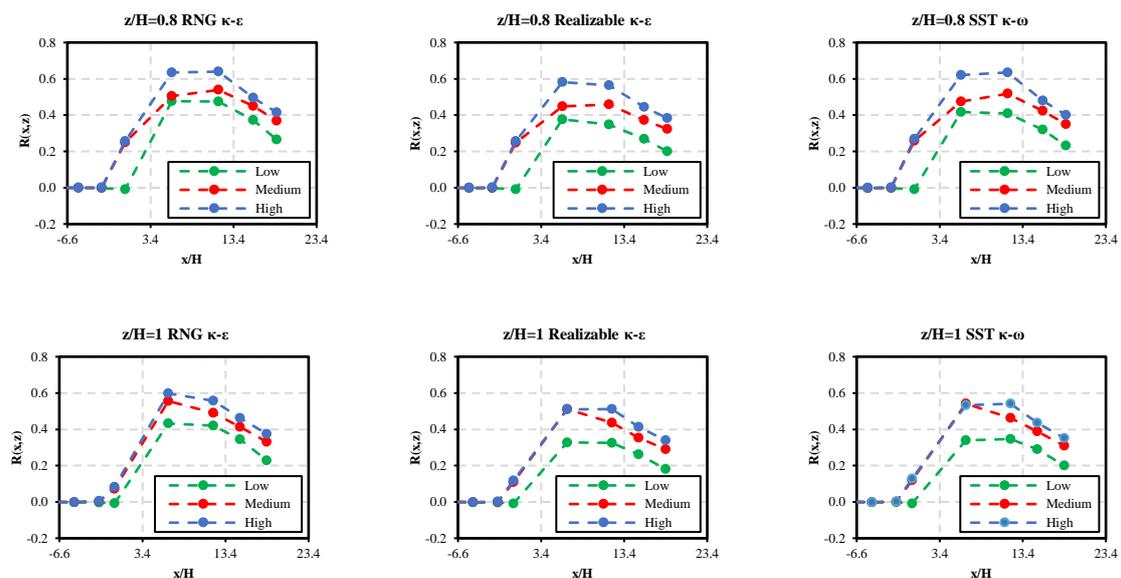
O coeficiente de resistência ( $C_i$ ) apresentou maior influência dentro da barreira (em  $x$ ) e dentro do dossel (em  $z$ ). Na proporção que se afasta dessas regiões, sua influência reduz chegando a valores semelhantes, como na esteira e acima da copa das árvores. Destaque para o resultado dos modelos para baixa densidade que apresentou uma variação ainda menor na esteira, diferença de 20%, e para alta densidade pelo modelo Realizável, o qual apresentou resultados semelhantes na esteira, entretanto mostrou variação significativa no perfil vertical.

O valor de  $LAD_{\text{máx}}$  de  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  forneceu a melhor concordância com os dados experimentais, especialmente em densidades maiores (média e alta), enquanto que o valor de  $LAD_{\text{máx}}$   $0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  forneceu melhor ajuste para densidade baixa. Esse comportamento pode estar relacionado à modificação das características aerodinâmicas que ocorre em algumas espécies de plantas quando expostas a carga de vento fortes. As plantas tornam-se mais compactas em velocidades de vento mais altas, o que minimiza a área de superfície exposta e reduz a força de resistência (MIRI; DRAGOVICH; DONG, 2018). Isso resulta na alteração da resistência causada pela vegetação ao escoamento do vento que é calculada em função de  $C_i$  na simulação numérica.

Observa-se, portanto, que o valor do  $C_i$  apresenta maior influência para menores densidades, ao passo que em densidade maiores, a resistência individual da planta diminui em função da proximidade entre elas, assim, o espaçamento e a densidade na área plantada apresenta maior influência na coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  do que o valor de  $C_i$ .

### 5.1.3 Análise da influência da variação da densidade de área plantada (densidade da barreira vegetal) no coeficiente de resistência inercial

A avaliação do efeito da densidade da barreira de vento na redução da velocidade a jusante é importante para proteção de erosão de terrenos planos e pilhas de materiais. Na Figura 32 são apresentados resultados simulados utilizando diferentes modelos de turbulência para baixa, média e alta densidade de barreira. No perfil horizontal em  $z = 0,8H$ , observa-se que o aumento da densidade levou a uma maior redução da velocidade do vento na região da vegetação e a área de abrigo a jusante também apresentou redução mais significativa da velocidade. A medida que o escoamento passa por entre as árvores, verifica-se que a redução da velocidade aumenta e atinge o topo próximo de  $x = 8,4H$ . No entanto, esse mesmo comportamento não ocorre para a altura  $z = 1H$ . A redução da velocidade do escoamento é observada na variação da densidade baixa para média, enquanto que de média para alta densidade essa variação é irrelevante.



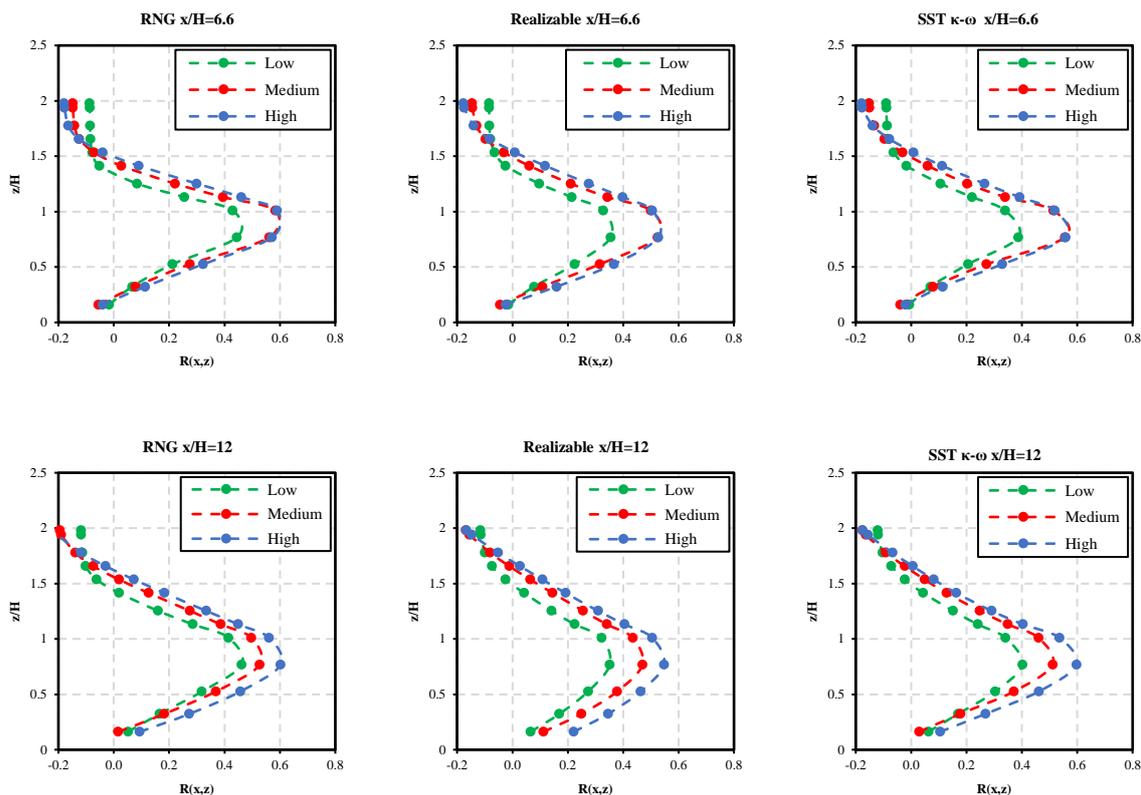


Figura 32: Comparação dos perfis vertical e horizontal do coeficiente adimensional de redução da velocidade da velocidade para diferentes modelos de turbulência ( $\kappa$ - $\epsilon$  RNG;  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST) medido em diferentes densidades.

Observando os perfis verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  em  $x = 6,6H$ , verifica-se que o comportamento estável, ou seja, a partir dessa posição, a variação da densidade plantada não implica em alteração no valor de  $R(x,z)$  para densidades média e alta. No entanto, para baixa densidade o perfil apresentou uma redução da velocidade menos intensa. Miri et al. (2017) destaca em seu estudo que a redução da velocidade é afetada, principalmente, para plantas de baixa densidade, enquanto média e alta densidades apresentam implicam em redução semelhantes.

O aumento da densidade de área plantada resultou um alongamento do perfil vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$ . A resistência criada ao escoamento na região entre as árvores, analisando a equação da continuidade, nos permite concluir a aceleração do escoamento na camada superior da vegetação. Nessa área, a velocidade observada é maior, conforme pode ser visto no perfil de  $R(x,z)$  na vertical apresentado na Figura 32. O perfil de  $R(x,z)$  é deslocado para cima e apresenta uma menor redução da velocidade nesse ponto. Modificações no coeficiente adimensional de redução

da velocidade medido na horizontal também são verificadas, como da redução máxima e ponto de retomada da velocidade. Os resultados obtidos para média e alta densidade de barreira foram mais próximos que quando comparados aos resultados obtidos para baixa densidade similares. A proximidade dos resultados dos perfis de coeficiente de redução da velocidade para as densidades média e alta é igualmente reportada nos experimentos de Miri et al. (2017).

#### **5.1.4 Análise da influência da variação do perfil vertical (N) do coeficiente de resistência inercial no escoamento**

A resistência sofrida pelo escoamento em barreiras de vento compostas por vegetação não é uniforme ao longo da extensão vertical das plantas, pois é influenciada pelas estruturas internas que compõe a vegetação, como folhas e galhos, caule e copas.

Conforme apresentado na Seção 3.2, Lalic e Mihailovic (2004) definiram uma relação empírica para a descrição da distribuição vertical da LAD, que é utilizada para correlacionar a resistência imposta pela vegetação ao vento. Conforme pode ser visto nessa relação, alguns parâmetros podem afetar o comportamento do escoamento e alterar os resultados simulados esperados, fornecendo comportamento não coerentes ao comportamento escoamento na atmosfera. Assim, a distribuição do coeficiente de resistência inercial  $C_i$  com a altura, representado pelo coeficiente N e a variação da altura do LAD máximo ( $H_{m\acute{a}x}$ ) foram investigados. A influência desses parâmetros no escoamento expresso pelo coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  é apresentado na Figura 33, na Figura 34 e na Figura 35.

Na Figura 33, na Figura 34 e na Figura 35 é apresentada a comparação dos resultados simulados numericamente pelo modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável com diferentes valores de  $N = 0, 2$  e  $4$  para três densidades: baixas, média e alta. A vegetação foi modelada utilizando uma distribuição vertical de LAD dado pela equação (13) com  $C_i = 0,2$  dados por  $LAD_{m\acute{a}x}$  igual a  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,  $H_{m\acute{a}x} = 95\%$

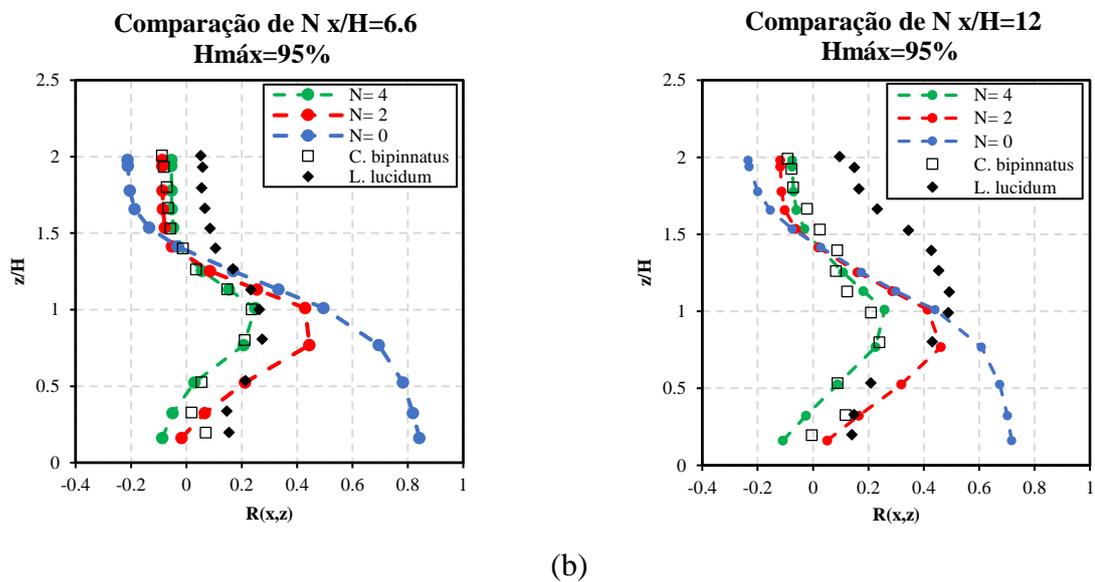
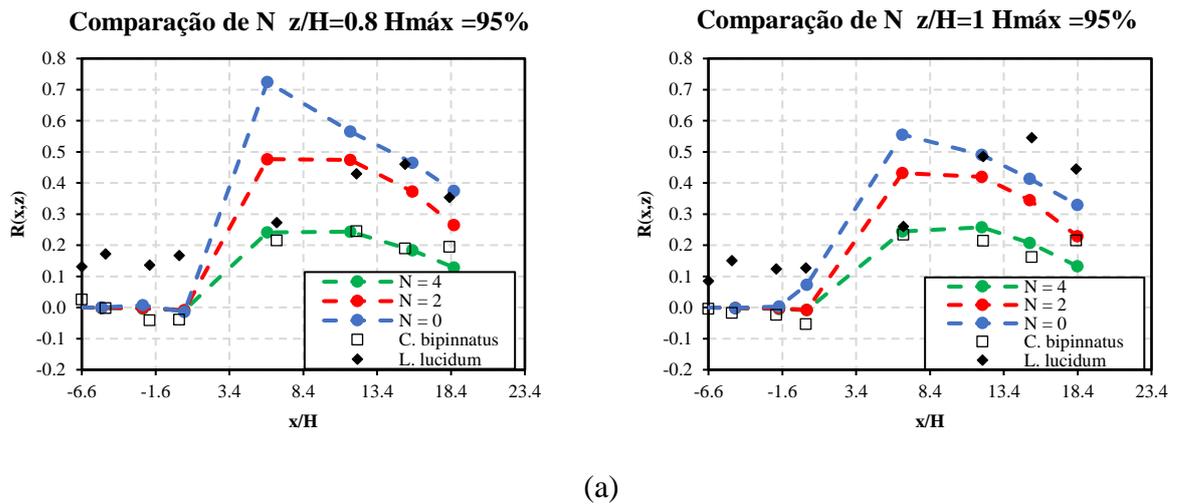
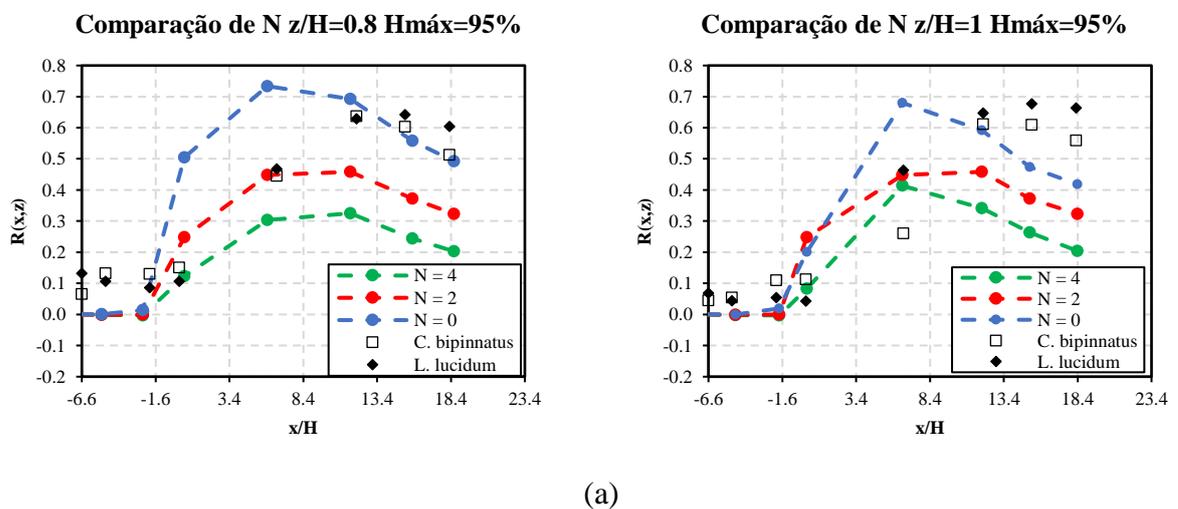
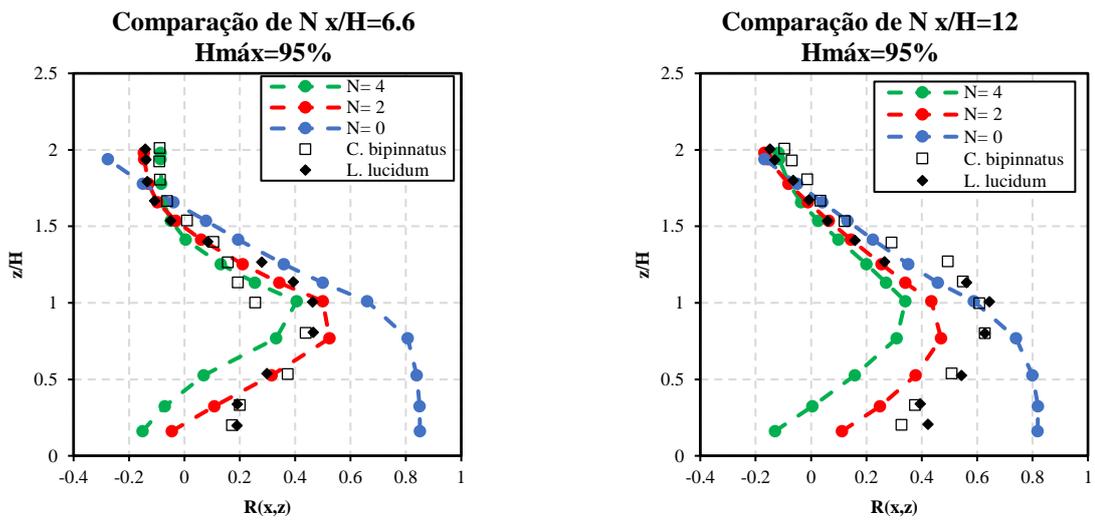


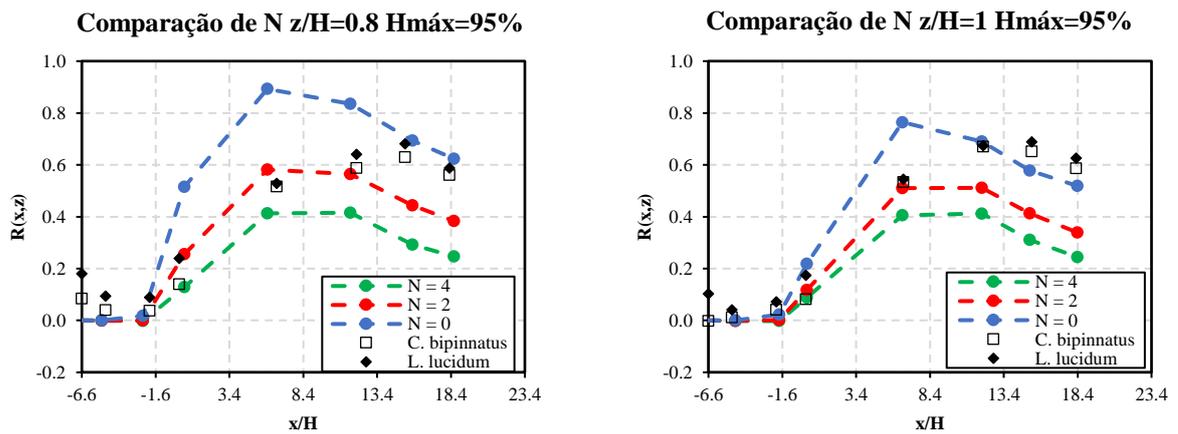
Figura 33: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de N (0, 2 e 4) para baixa densidade de barreira.



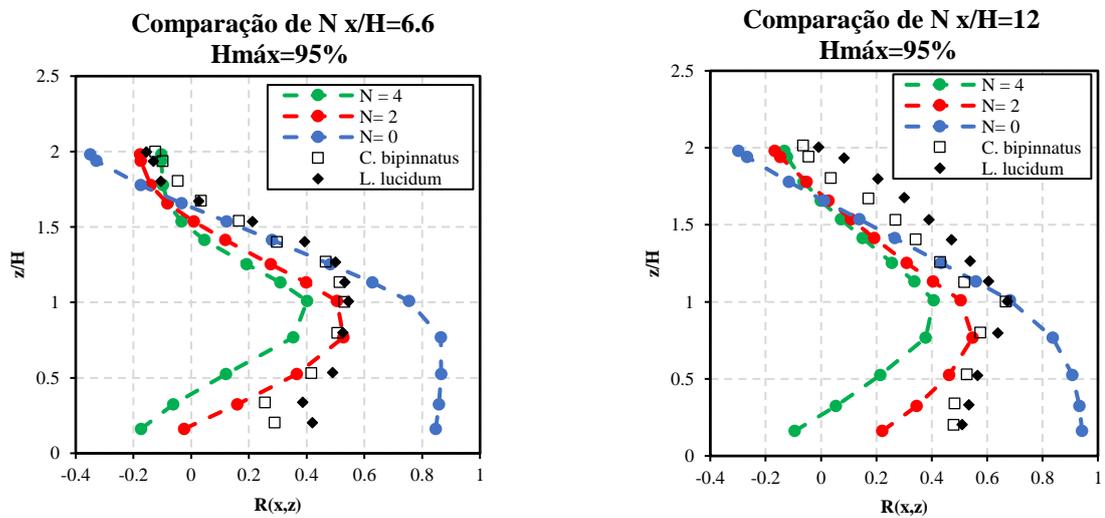


(b)

Figura 34: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de N (0, 2 e 4) para média densidade de barreira.



(a)



(b)

Figura 35: Comparação dos perfis (a) horizontais e (b) verticais do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) para alta densidade de barreira.

Os gráficos do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  apresentados na Figura 33, na Figura 34 e na Figura 35 representam vegetações com diferentes morfologias. Sabendo que modificações das características da planta interferem no comportamento do escoamento do vento, a introdução da distribuição vertical de  $C_i$  é avaliada. A partir da variação do parâmetro  $N$ , observa-se alteração do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  medido em diferentes regiões, sendo mais expressiva dentro da região da barreira, efeito também percebido nas camadas superiores logo acima da copa das árvores, conforme pode ser visto em  $z/H=0.8$  e  $z/H=1.0$ .

A modificação de  $N$  afetou principalmente a região de maior redução da velocidade ( $3,3 \leq x/H \leq 8,3$ ) nas alturas de  $z = 0,8H$  e  $1H$ , onde o pico de redução alcançou uma média de 0,75 nas densidades baixa e média, chegando próximo de 1,0 para densidades maiores quando  $N$  foi igual 0.

Nota-se que a introdução do detalhamento de  $C_i$ , a partir da utilização de  $N$ , melhorou a predição do escoamento próximo da vegetação, dentro da região da barreira. No entanto, houve uma piora da precisão dos resultados na esteira. A distribuição não uniforme vertical de  $C_i$ , mostra uma quantidade maior do escoamento que flui próximo ao solo e chega a esteira próxima com velocidade relativamente alta. Essa parcela de fluido com maior gradiente de velocidade leva uma maior transferência de quantidade de movimento entre as camadas do escoamento na esteira, resultando na redução menor da velocidade comparado ao resultado de  $N=0$ .

O perfil vertical de  $R(x,z)$ , no entanto, apresentou a maior influência do detalhamento do LAD com a altura, pois a redução mostra-se muito superior para variação de  $N$ , sendo ainda maior quando a distribuição vertical de  $C_i$  não é considerada ( $N=0$ ).

Os efeitos da variação do parâmetro  $N$  no comportamento do escoamento é apresentada na Figura 36 e na Figura 37. Nelas são mostrados planos com distribuição do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  para os planos  $xz$  em  $y = 0$  (centro do domínio) e  $xy$  em  $z = 0,8H$ .

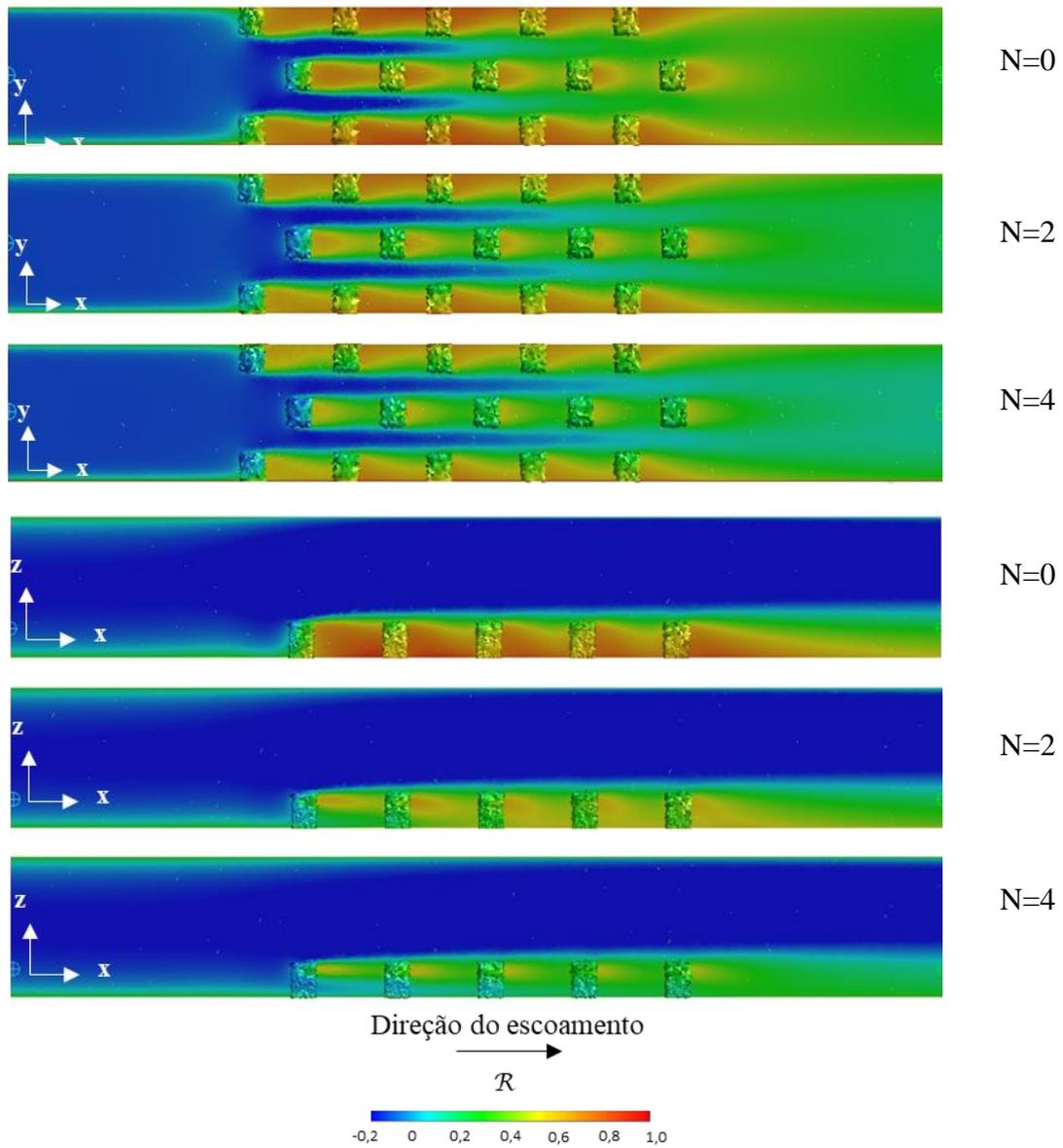


Figura 36: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) em baixa densidade de área plantada.

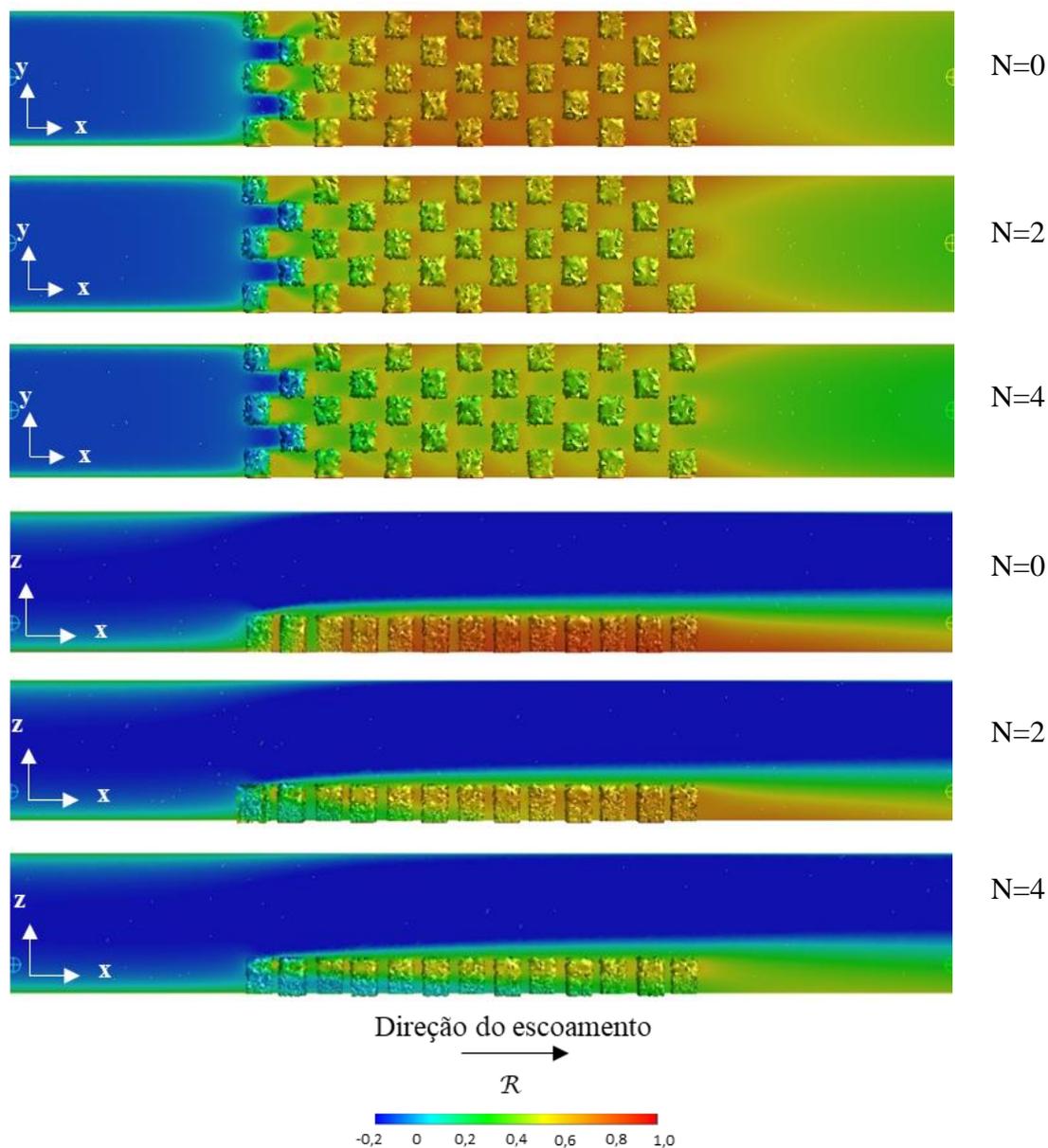


Figura 37: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade para diferentes valores de  $N$  (0, 2 e 4) em média densidade de área plantada.

Observa-se a partir da Figura 36 e da Figura 37 que quando a distribuição vertical do LAD não é considerada ( $N = 0$ ), a barreira vegetal se comporta como uma barreira artificial do tipo *windfence*, com porosidade uniforme em toda sua extensão. Assim, a capacidade de resistência imposta por essa ao escoamento do vento atua de forma igual ao longo da sua altura, alterando a extensão da região de abrigo e a magnitude da velocidade nela observada. Dessa forma, a precisão dos resultados pode ser comprometida e resultar em conclusões não verdadeiras.

A utilização do  $C_i$  uniforme causa uma superestimação da redução da velocidade dentro da barreira, porém, melhora os resultados na esteira. À medida que  $x$  aumenta na esteira da barreira, a influência da resistência das árvores reduz e o modelo retoma a velocidade, resultando na diminuição da superestimação, e ajustando-se ao nível de redução semelhante ao experimental.

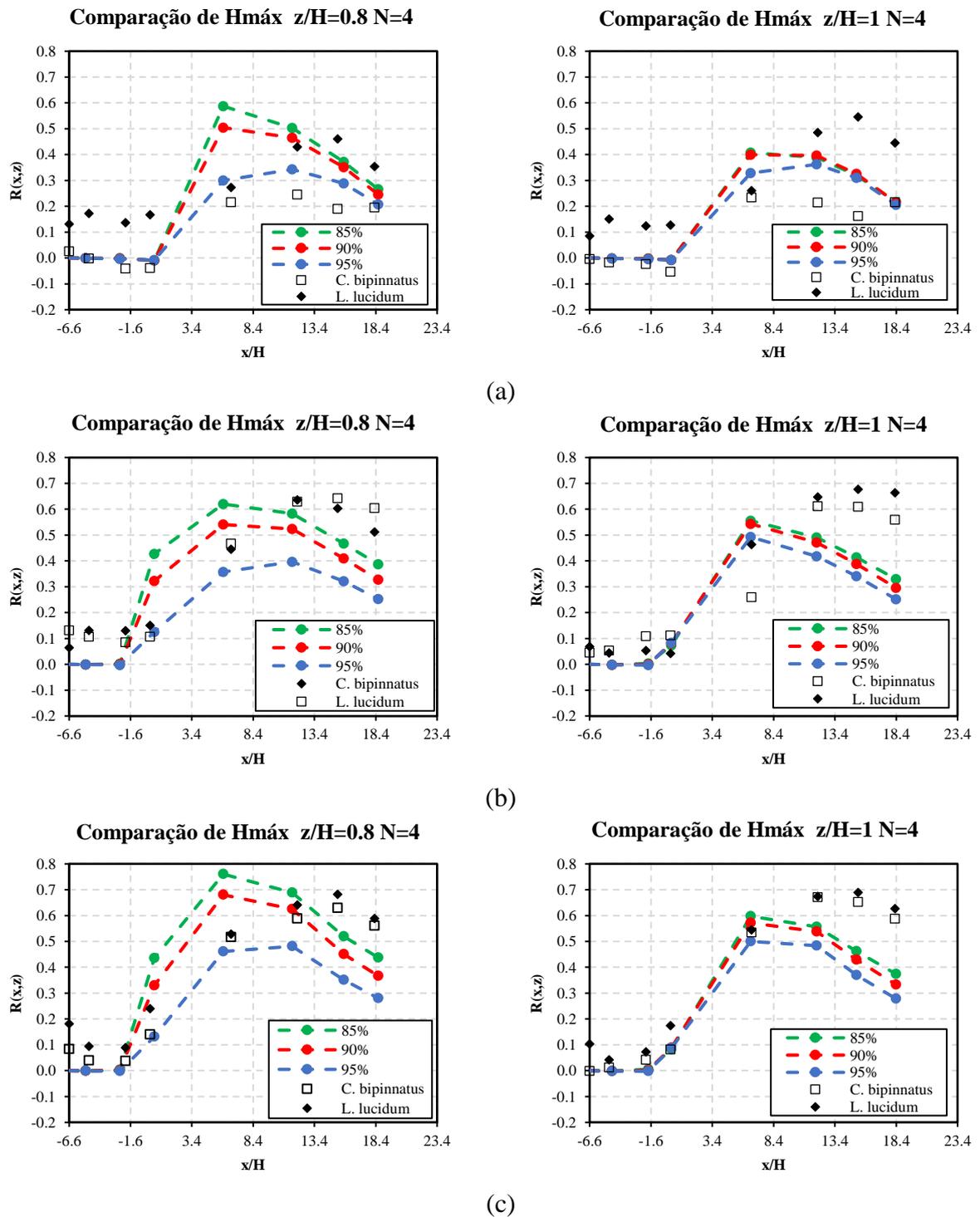
A melhoria na predição do escoamento na região da barreira é um resultado importante, visto a dificuldade apontada por trabalhos em estudos semelhantes. Liu et al., (2018), destaca em seu estudo a dificuldade de representação do escoamento próximo a vegetação. A uniformidade do coeficiente de resistência inercial na modelagem da vegetação foi apontada pelos autores como o fato responsável pela baixa concordância dos resultados.

Assim, é possível indicar que a variação vertical do coeficiente de resistência inercial (utilização do parâmetro  $N$  não nulo) forneceu melhor ajuste aos dados experimentais, possibilitou uma modelagem mais real da vegetação, além de maior representatividade dos efeitos causados por ela no escoamento. Resultado que confirma os apontamentos realizados por Desmond et al. (2014) e Zeng et al., 2020 para a modelagem do escoamento em vegetação. Segundo eles, a variação do coeficiente de resistência inercial, expresso pela descrição vertical do  $C_i$  fornece uma melhor representação do efeito da resistência imposta pelos elementos da vegetação ao escoamento do ar. Este resultado mostra a importância da utilização do perfil vertical de LAD para melhor representação da distribuição da força de resistência gerada pelas plantas no escoamento.

### **5.1.5 Análise da influência da altura de LAD máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ) no coeficiente de resistência inercial**

Outro importante parâmetro que modifica o comportamento do escoamento do vento na presença de vegetação é a altura onde o valor da LAD é máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ). Destaca-se que sua relevância está relacionada ao emprego da equação desenvolvida por Lalic e Mihailovic (2004). Assim, na Figura 38 e na Figura 39 são apresentadas a comparação dos resultados simulados numericamente para diferentes valores de  $H_{m\acute{a}x}$ . A vegetação foi modelada utilizando uma distribuição vertical de LAD dada pela equação (13) com  $C_i =$

0,2 e por  $LAD_{\text{máx}}$  igual a  $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e três diferentes posições (alturas) com densidade máxima de área foliar (85%, 90% e 95%) considerando  $N = 4$  e 2.



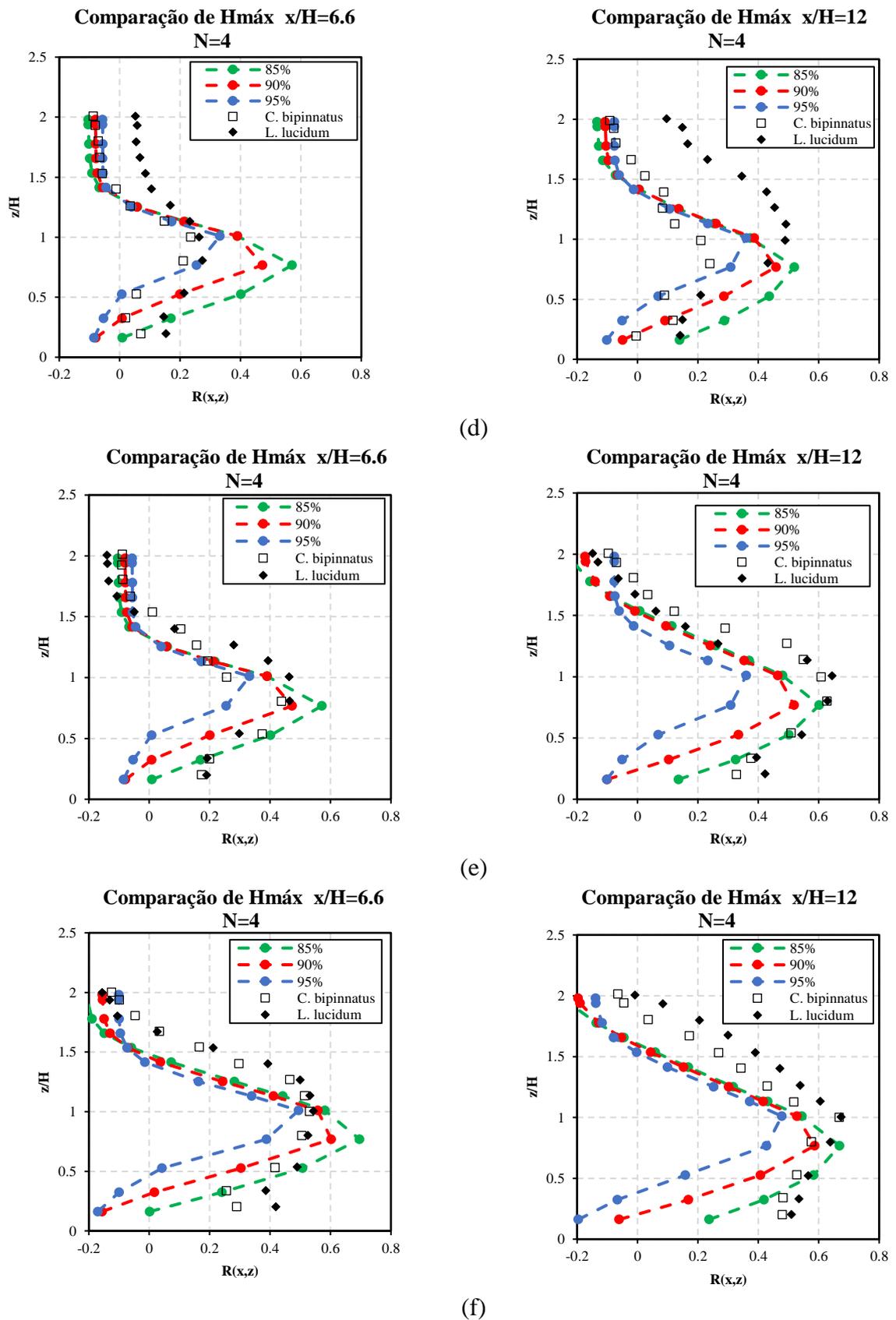
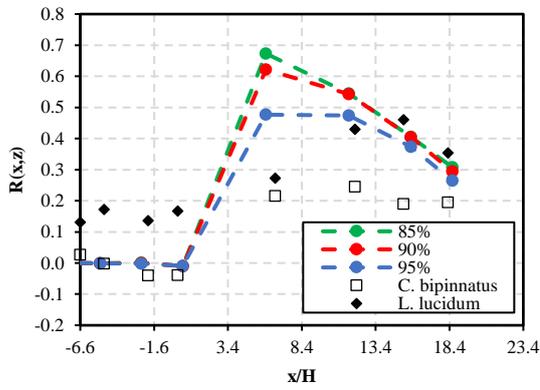
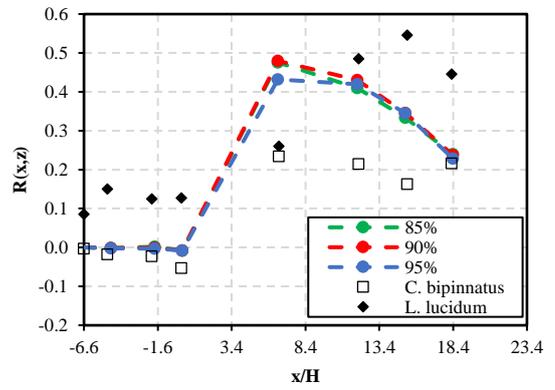


Figura 38: Perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de reduao da velocidade com  $LAD_{m\acute{a}x}$  de  $1m^2/m^3$  para diferentes porcentagem de altura de  $H_{m\acute{a}x}$  (85%, 90% e 95%) para  $N=4$  nas densidades (a) e (d) baixa, (b) e (e) media e (c) e (f) alta.

Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=0.8$   $N=2$

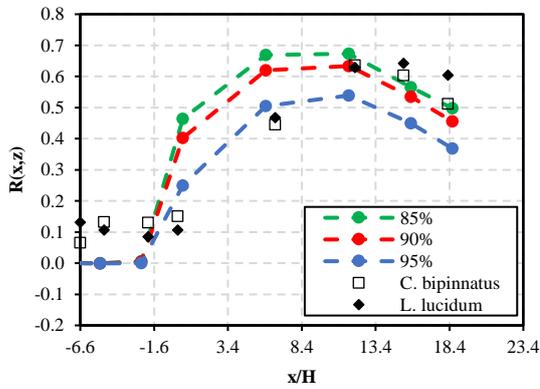


Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=1$   $N=2$

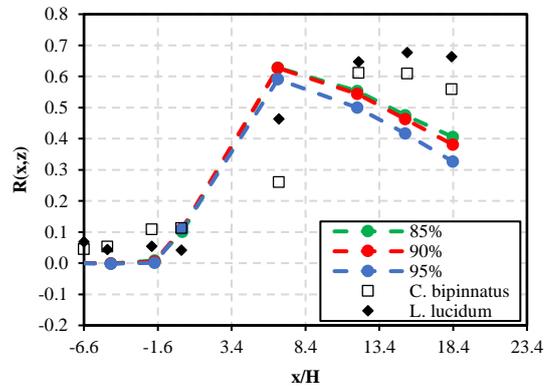


(a)

Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=0.8$   $N=2$

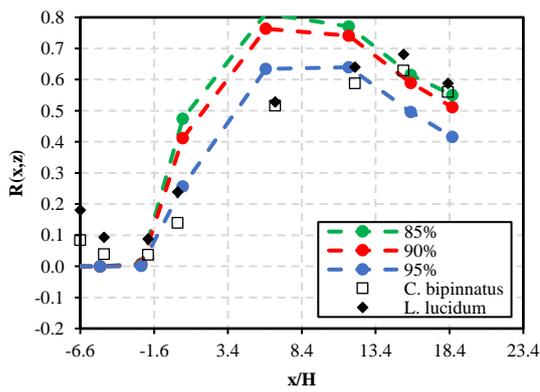


Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=1$   $N=2$

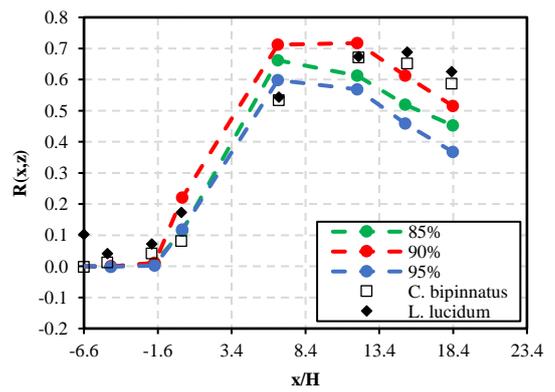


(b)

Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=0.8$   $N=2$



Comparação de  $H_{m\acute{a}x}$   $z/H=1$   $N=2$



(c)

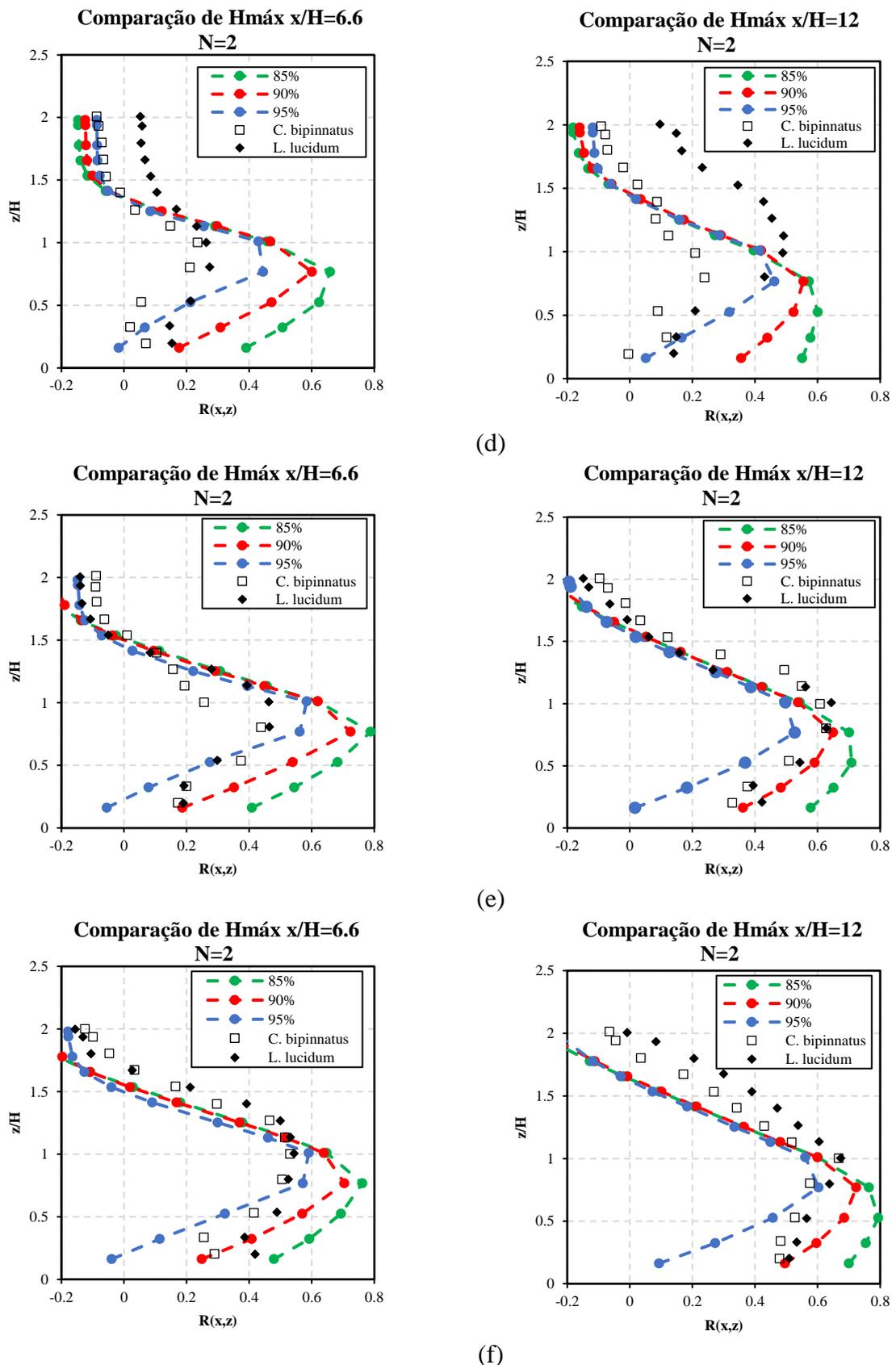


Figura 39: Comparação dos perfis horizontal e vertical do coeficiente adimensional de redução da velocidade com  $LAD_{\text{máx}}$  de  $1\text{m}^2/\text{m}^3$  para diferentes porcentagem de altura de  $H_{\text{máx}}$  (85%, 90% e 95%) para  $N=2$  nas densidades (a) e (d) baixa, (b) e (e) média e (c) e (f) alta.

Diferente dos resultados encontrados com a variação de  $N$ , a modificação do valor de  $H_{m\acute{a}x}$  causa maior influência no escoamento dentro da região do dossel da vegetação (veja Figura 38 e Figura 39  $z = 0,8H$  e  $1H$ ). Nas camadas logo acima do dossel ( $z=1H$ ), a sensibilidade da variação  $H_{m\acute{a}x}$  é menor, sendo insignificante quando comparado ao seu efeito no dossel.

No perfil vertical, no entanto, a variação de  $H_{m\acute{a}x}$  altera significativamente os resultados do coeficiente adimensional de redução da velocidade obtidos, afetando assim a características da região de esteira formada a jusante da barreira. Essa alteração modifica a distribuição das características da resistência imposta pelas estruturas internas da vegetação, dessa forma a correta estimativa de tal parâmetro melhora a capacidade de predição do comportamento dos campos de velocidade e turbulência avaliados, contribuindo assim na maior precisão dos resultados observados nas regiões de interesse, área de abrigo a ser protegida pela barreira de vento.

#### **5.1.6 Análise da influência da variação vertical de LAD (valor de $N$ ) na velocidade de fricção à jusante da barreira vegetal**

As barreiras de vento são utilizadas para proteção da erosão eólica em pilhas de estocagem. Alguns trabalhos apresentados na literatura foram realizados buscando avaliar a influência das barreiras de vento na redução da velocidade e na extensão da zona de abrigo formada à jusante dela (BITOG et al., 2012; CONG et al., 2011; SONG et al., 2014; YEH; TSAI; YANG, 2010). A barreira de vento impacta a estrutura aerodinâmica do escoamento circunvizinho, influenciando as condições de turbulência e promovendo a redução da velocidade do vento à jusante da barreira, alterando o potencial de erosão na superfície.

Em estudos de erosão eólica a velocidade de fricção é uma das variáveis mais importantes, pois descreve a força exercida na superfície pelo cisalhamento do vento (YAPING; SHAO, 2008). A velocidade de fricção é uma velocidade conceitual que representa o cisalhamento, sendo calculada pela equação:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (77)$$

onde  $u^*$  é a velocidade de fricção (m/s),  $\tau_o$  é a tensão de cisalhamento na superfície sólida ( $\text{kg/m.s}^2$ ) e  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ).

A ferramenta computacional da dinâmica dos fluidos computacional com o uso do modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável foi selecionado para construção dos gráficos da presente seção.

A velocidade de fricção normalizada é apresentada para cenários com baixa e alta densidades de barreira, calculada ao longo da linha central do domínio buscando avaliar dentre outros fatores os efeitos na utilização de uma barreira de vento vegetal no comportamento da velocidade de fricção dentro da região de cobertura vegetal, bem como na zona de proteção que se desenvolve a jusante de uma barreira de vento. A velocidade de fricção foi normalizada pela  $u_{*ref}$  (velocidade de fricção obtida numa região não perturbada pela barreira), ou seja, 0,437 m/s.

Na Figura 40 é apresentada a velocidade de fricção para baixa e alta densidade de uma barreira com características morfológicas descrita com LAD uniforme ( $N=0$ ) igual 0,5  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Nas Figura 41 e Figura 42 são apresentados os resultados para vegetação com características morfológicas expressada com o perfil vertical exponencial do LAD para  $N=2$  e  $N=4$ , respectivamente. O modelo de fechamento da turbulência de duas equações  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável foi utilizado para esta análise.

Para barreira vegetal com  $N=0$  (LAD uniforme), observa-se para ambas as densidades de barreira um aumento da velocidade de fricção na parte inicial da área plantada, local onde o escoamento incide sobre as árvores. A medida que o escoamento passa pela barreira, há uma redução da velocidade de fricção. Diferenças importantes são vistas no comportamento para cada densidade de barreira. Na barreira com baixa densidade ocorre uma canalização do escoamento que resulta no aumento da velocidade de fricção nesta região, enquanto que entre as árvores a velocidade de fricção é menor. Nota-se que o aumento da velocidade que ocorre na canalização influencia a velocidade de fricção na

linha central próximo das árvores, um aumento é observado a partir da metade da área plantada ( $x > 7H$ ), ver Figura 40.

O efeito de canalização não é verificado para barreira com alta densidade. O aumento do número das plantas, reduz o espaço entre as árvores e dificulta a retomada o desenvolvimento da velocidade. Assim, a velocidade de fricção alcança níveis menores na região dentro da vegetação, bem como a jusante vento dessa na zona de esteira.

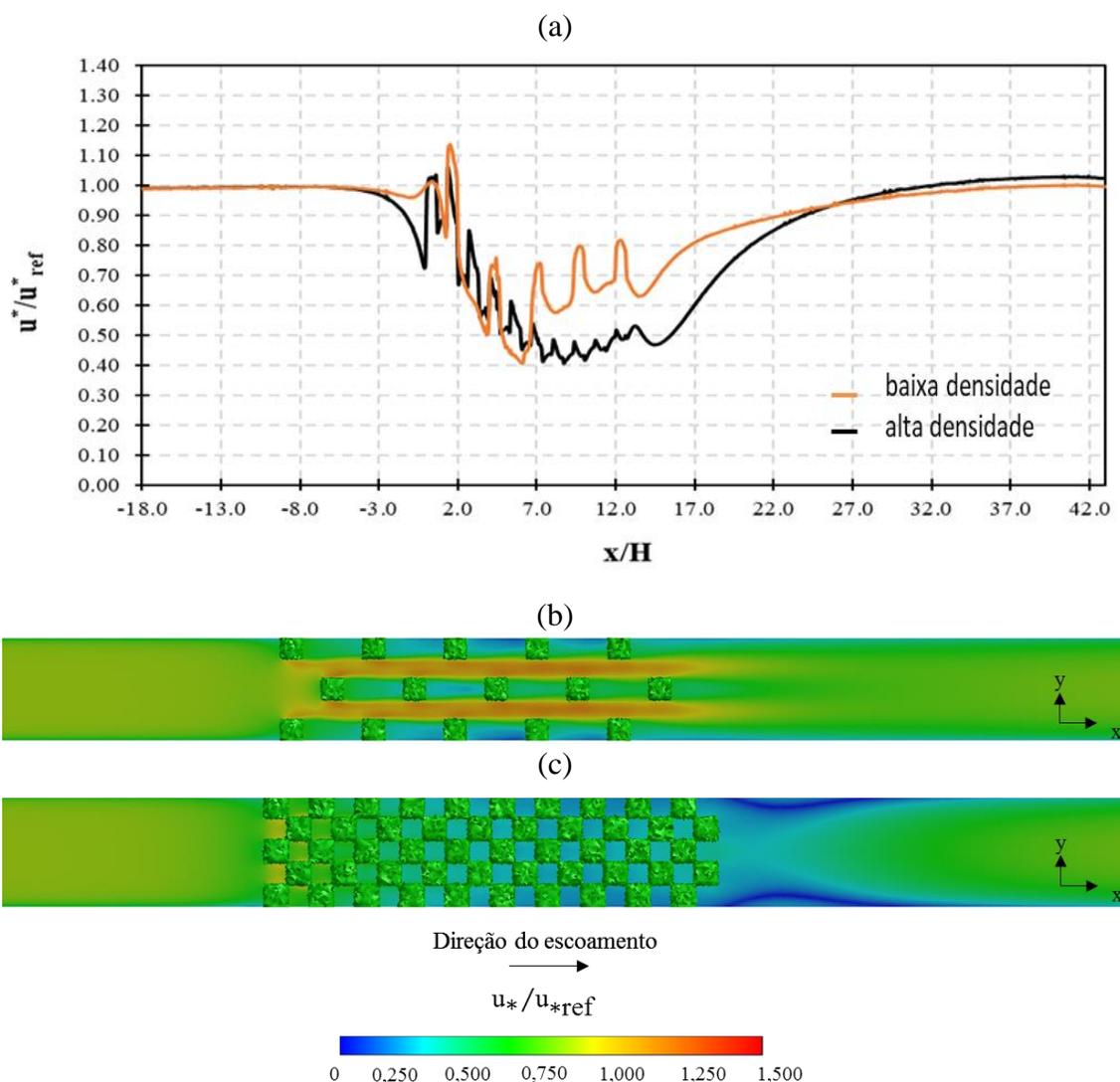


Figura 40: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b) baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD=0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical uniforme ( $N=0$ ).

A jusante da barreira observa-se uma redução da velocidade de fricção em uma pequena distância e após a região de máxima redução encontrada na esteira, ela volta a aumentar de forma gradativa alcançando em  $x=32H$  magnitude igual ao valor obtido a montante dessa. Destaca-se que o aumento observado ocorre de forma semelhante para as diferentes densidades, porém a redução da velocidade de fricção é verificada na barreira com alta densidade.

Resultado diferente é observado para vegetação com  $N=2$  e  $N=4$  em relação a vegetação com  $N=0$ . Na Figura 41 mostra semelhante elevação da velocidade de fricção dentro da região com vegetação para ambas densidades, no entanto importante diferença é verificada na zona de esteira próxima e afastada da barreira. Na condição de baixa densidade a magnitude da velocidade de fricção apresenta redução em torno de 10% a jusante da barreira, mantendo em um valor aproximadamente constante. Resposta análoga é encontrada no resultado da velocidade de fricção calculada a jusante da barreira com densidade alta. As árvores causam uma importante redução (40%) na região de abrigo, porém sua retomada é acentuada atingido em  $10H$  na esteira magnitude semelhante aos resultados calculadas para densidade baixa.

Para barreira de vento com perfil vertical de  $LAD_{máx}$  para  $N=4$ , o comportamento da velocidade foi relativamente diferente dos casos anteriores. A vegetação elevou os níveis da variável, especialmente dentro da área planta em aproximadamente 15%, no entanto a jusante da barreira houve uma importante redução. Logo após a barreira, a velocidade de fricção começa a reduzir atingindo os menores níveis em  $x=20H$  (aproximadamente  $7H$  depois da barreira), sendo que uma magnitude menor é observada até  $x=30H$  ( $18H$  a jusante da barreira). Uma possível explicação para este comportamento seria que nesta configuração a energia transferida da superfície para as camadas superiores é menor, resultando o menor aumento da velocidade acima do dossel. Isso a jusante da barreira resulta no recolamento mais distante do escoamento e uma região de abrigo maior. Assim, uma importante relação é observada quanto ao retorno da velocidade do escoamento (reequilíbrio). Quanto maior a resistência causa pela barreira vegetal, maior são os gradientes de velocidade nas camadas acima do dossel, que provoca transferência maior da quantidade de movimento para superfície, resultando no recolamento próximo a barreira e retomada rápida da velocidade, enquanto, na barreira que permite a passagem maior da parcela de fluido na superfície, a transferência de energia das camadas acima do

dossel ocorrerá mais lentamente, resultando no ponto de recolamento mais distante da barreira e o retorno do perfil de velocidade também será mais lento. Isso resulta em uma região de abrigo maior, porém com magnitude da velocidade de fricção superiores aos casos anteriores ( $N=0$  e  $N=2$ ).

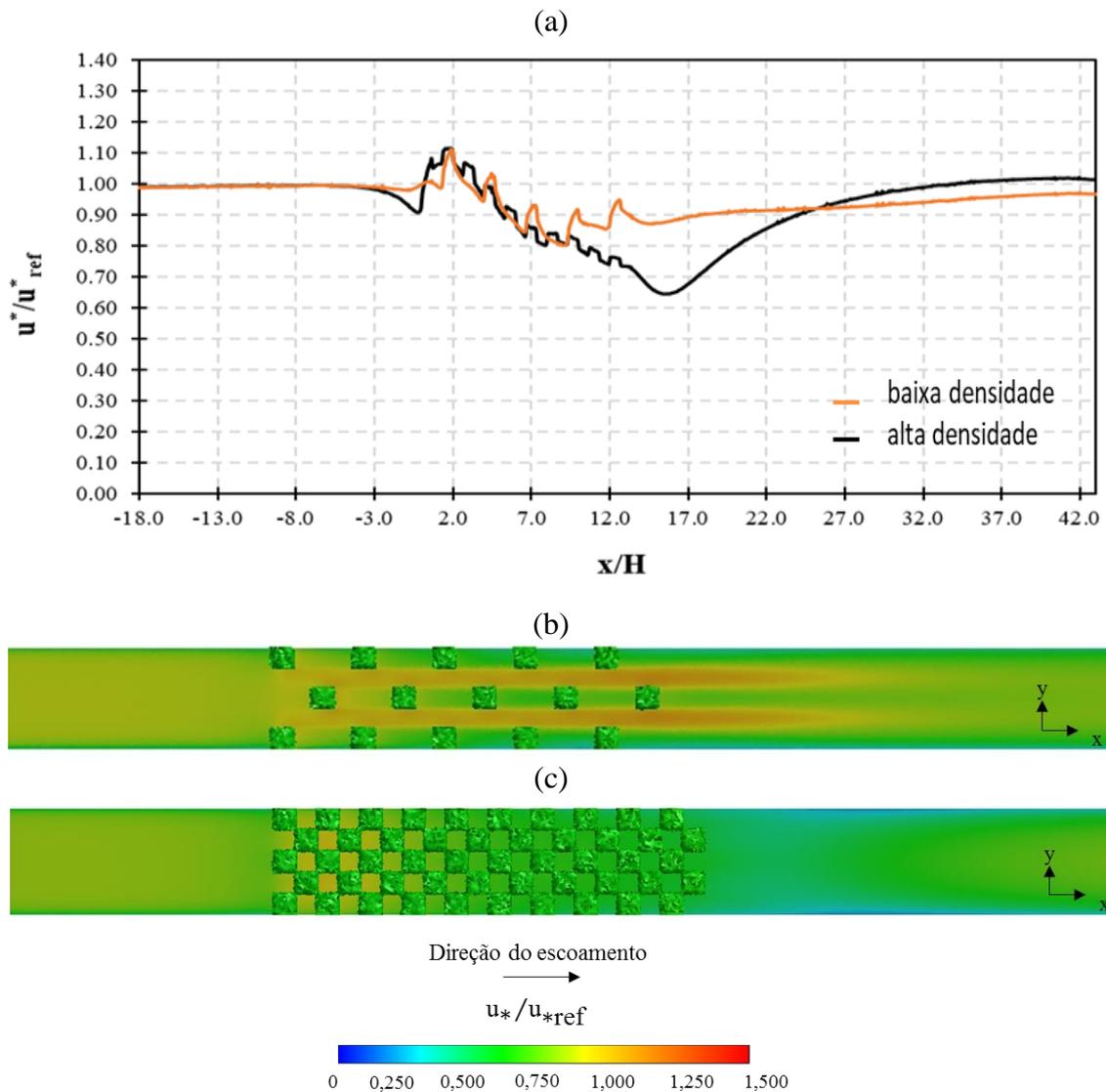


Figura 41: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b) baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD_{máx} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical exponencial com  $N=2$

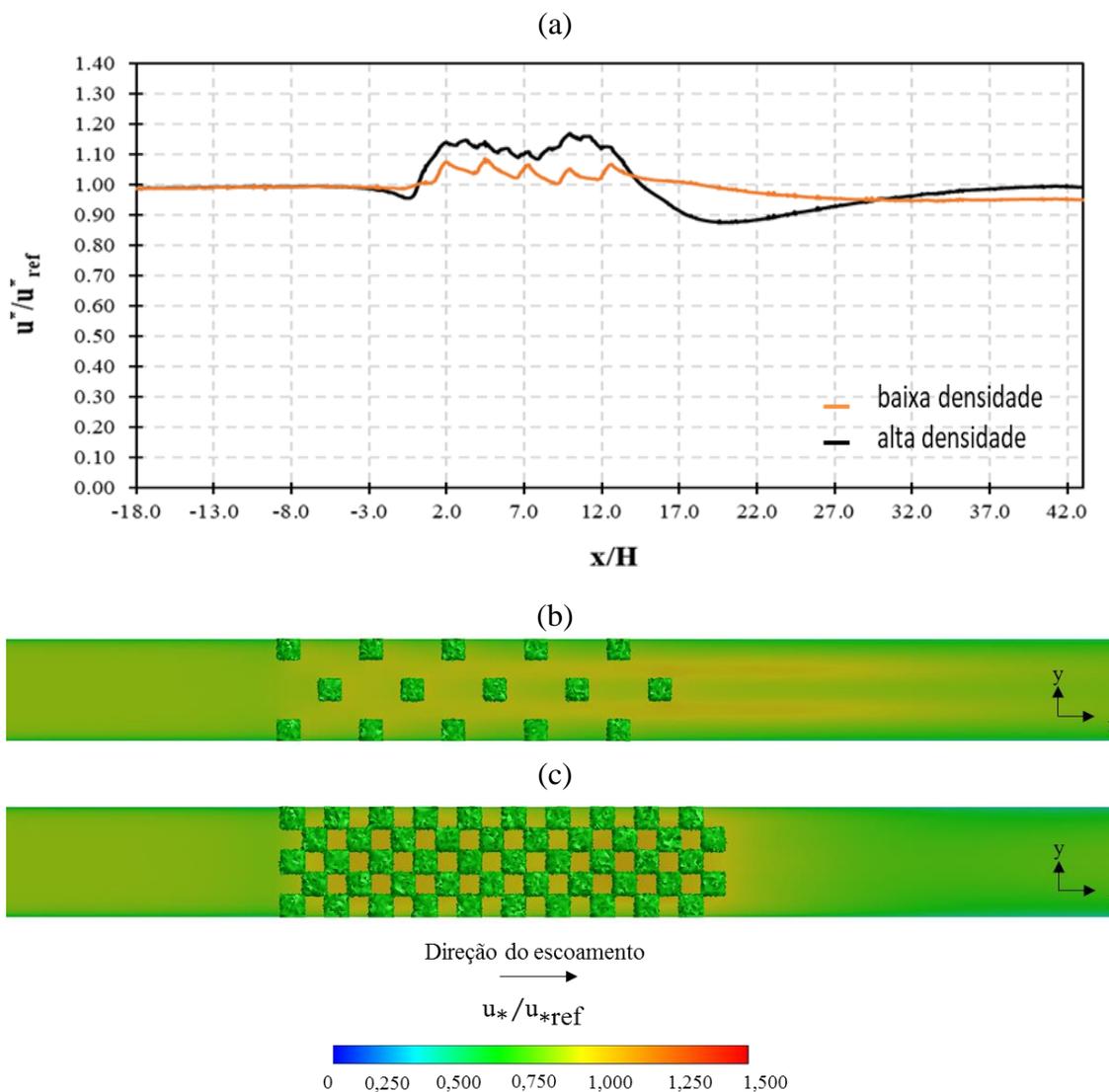


Figura 42: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para baixa (linha laranja) e alta densidades (linha preta) acompanhados dos respectivos contorno da velocidade de fricção calculados para (b) baixa e (c) alta densidades para uma vegetação de barreira com morfologia de  $LAD_{m\acute{a}x} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  e perfil vertical exponencial com  $N=4$ .

### 5.1.7 Análise da influência da variação vertical de LAD (valor de N) no campo de velocidade à jusante da barreira vegetal

Na Figura 43, na Figura 44 e na Figura 45 é apresentado os resultados do campo da componente longitudinal da velocidade (direção x) para baixa e alta densidade em uma vegetação com características morfológicas  $LAD_{m\acute{a}x} = 0,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para  $N=0$ ,  $N=2$  e  $N=4$ , respectivamente. O campo de velocidade foi obtido em plano xz central do domínio computacional ( $y=0$ ), onde a barreira de vegetação está localizada a partir da posição  $x=0$ . As posições destacadas na distribuição de velocidades na Figura 43, na Figura 44 e na

Figura 45 estão apresentadas como  $x/H$  e  $z/H$  ( $H=0,15m$ ), respectivamente para os eixos horizontal e vertical.

Ao se aproximar da face incidente da vegetação em  $x=0$  o escoamento recebe o efeito das árvores que atuam como obstáculos à passagem do vento. A resistência causada pela barreira de vegetação resulta no deslocamento do escoamento que causa aceleração nas camadas de fluido logo acima do topo da vegetação. Este comportamento se intensifica com o aumento da densidade, pois o aumento das plantas redução a capacidade de escoamento do ar ocasionando a redução da velocidade nesta região.

Contudo, uma parte do escoamento consegue passar pelo dossel das plantas, com a velocidade reduzida devido à estrutura interna das plantas que funcionam como um meio poroso. A este tipo de escoamento é dado o nome do inglês *flow bleed*. A redução da velocidade é então intensificada pela presença das árvores adjacentes a jusante. Observa-se que à medida que o escoamento passa entre as árvores mais quantidade de movimento é retirado do escoamento e menor é sua velocidade, resultando em uma região de baixa velocidade a jusante da área plantada, zona denominada região de abrigo.

A quantidade de movimento retirada da região abaixo da altura das árvores ( $z \leq 1H$ ), promove a aceleração do escoamento na região acima da copa das árvores. A velocidade nesta região aumenta à medida que o escoamento flui sobre o dossel para jusante da área plantada. A velocidade média abaixo da região do dossel é reduzida enquanto que acima da altura das árvores a velocidade aumenta significativamente, como pode ser visto em  $x/H=14$ .

A medida que escoamento se afasta do dossel da vegetação a jusante, o efeito de resistência das plantas é reduzido e a velocidade se recupera, perdendo assim as características da influência do dossel e voltando ao seu estado de equilíbrio semelhante à velocidade inicial sem a presença da barreira vegetal.

A mudança nas características morfológicas da vegetação, representada pela variação do perfil vertical de  $LAD_{máx}$  influencia a formação das regiões características formadas ao redor da barreira vegetal, modificando a dimensão e intensidade essas regiões, como pode ser visto nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

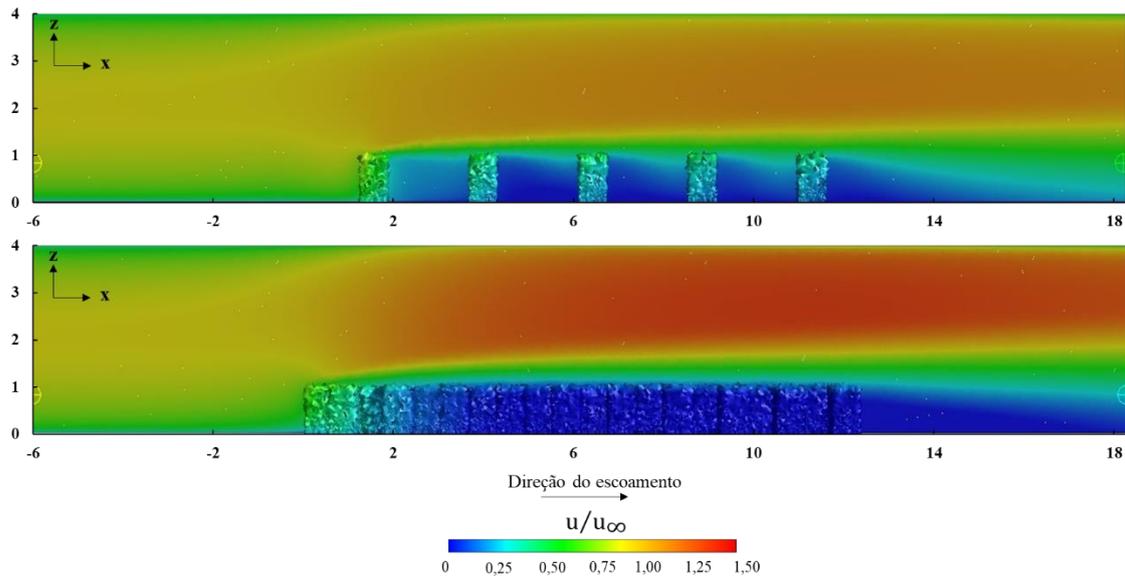


Figura 43: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^3/\text{m}^3$ ,  $N=0$  para baixa e alta densidade, respectivamente.

Na Figura 43 com vegetação com distribuição uniforme de LAD, observa-se a formação de uma região de velocidade baixa atrás de cada planta. Nesta configuração de barreira o escoamento sofre resistência igual no eixo vertical, dificultando a passagem do escoamento próximo a superfície e forçando o fluido a contornar o obstáculo. Além disso, o fluido que consegue atravessa a barreira forma um escoamento uniforme na região atrás da planta, semelhante a formação do escoamento observado em barreiras porosas artificiais.

Nas Figura 44 e Figura 45, observa-se que a implementação da distribuição vertical do  $LAD_{\text{máx}}$  modifica significativamente todas regiões ao redor da barreira vegetal. As camadas cisalhantes acima da vegetação apresentam um aumento relevante da velocidade comparado ao escoamento a montante distante da barreira. Diferentemente da barreira com  $N=0$ , para as barreiras com  $N=2$  e  $N=4$  níveis de velocidade diferentes são encontrados atrás de cada planta e a velocidade do escoamento dentro da área plantada é reduzida progressivamente. Além disso, uma zona de recirculação com baixa velocidade e baixa pressão é formada na esteira de cada árvore próximo da altura do dossel.

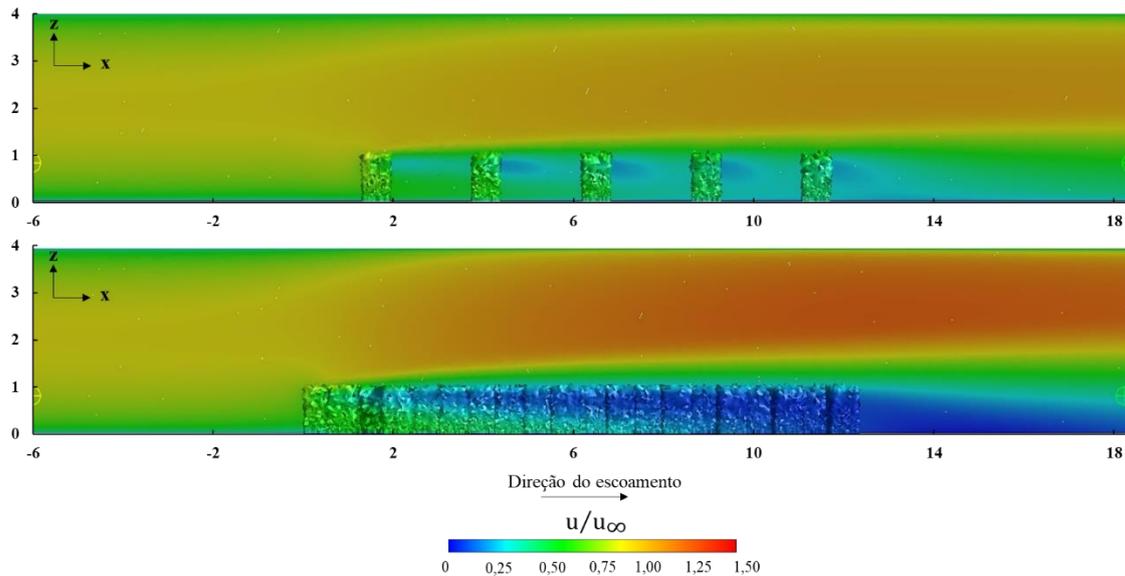


Figura 44: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $N=2$  e  $H_{\text{máx}}= 85\%$  para baixa e alta densidade, respectivamente.

Abaixo do dossel, próximo à superfície observa-se uma região com escoamento acelerado. Este comportamento é devido aos grandes espaços entre os troncos das árvores, diminuindo assim a resistência sofrida pelo escoamento que possibilita uma maior quantidade de fluido fluir livremente nesta região. Comportamento semelhante foi encontrado por Desmond et al. (2014) em seu estudo. Este efeito é maior para  $N=4$ , onde a velocidade acelerada ultrapassa a área planta e é observada até  $1,5H$  a jusante da barreira com alta densidade, ver Figura 50. Para  $N=2$ , no entanto, o efeito de jato é menor e não permanece em toda área com vegetação, sendo que este comportamento é reduzido a medida que aumenta a densidade da área plantada. O aumento da densidade eleva a perda de movimento no escoamento devido a maior quantidade de obstáculo, no entanto, essa redução ainda é pequena em relação a diminuição da velocidade observada na parte superior, causada pelo dossel.

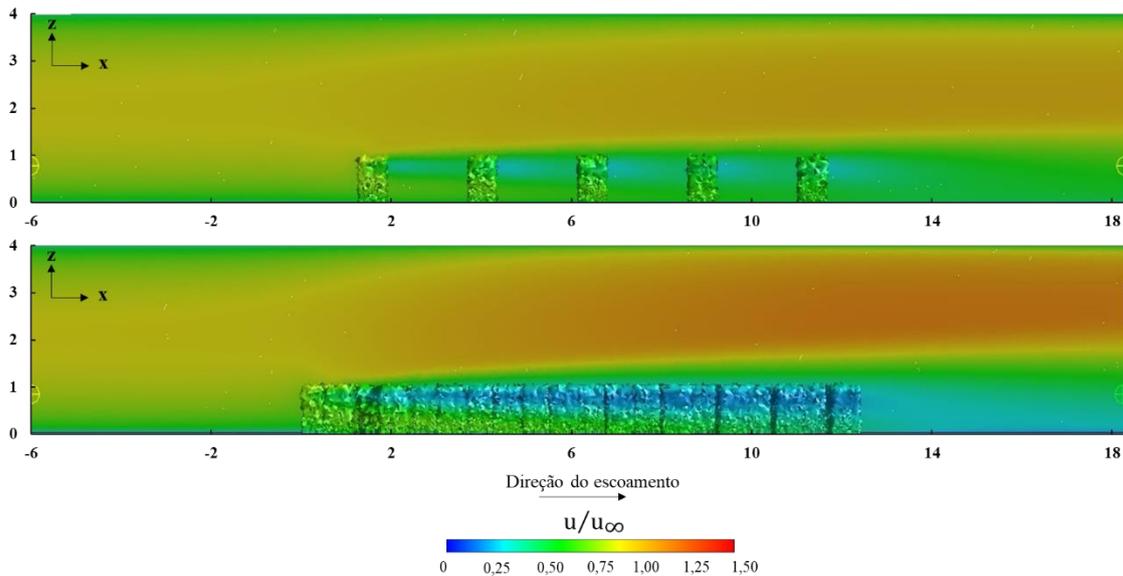


Figura 45: Comparação do campo de velocidade da componente x da velocidade no plano vertical em  $y=0$  para vegetação com  $0,5\text{m}^2/\text{m}^3$ ,  $N=4$  e  $H_{\text{máx}}=85\%$  para baixa e alta densidade, respectivamente.

Outro ponto a ser destacado é modificação que a distribuição vertical de  $LAD_{\text{máx}}$  causa na esteira. Para  $N=2$  observa-se uma redução maior da velocidade média do escoamento em relação a  $N=4$ , isso indica que barreiras compostas por árvores com copas maiores em extensão vertical, resultam em velocidade menor na esteira e conseqüentemente maior proteção das áreas a jusante. Porém, como visto na seção anterior ao avaliar a velocidade de fricção, a extensão de proteção proporcionada por  $N=2$  é inferior a barreira com  $N=4$ . Assim, para determinação da barreira de vento a ser implantada para proteção é importante avaliar a porcentagem de redução desejada em altura e extensões diferentes, considerando objetivo pretendido para controle de erosão na superfície do solo e/ ou em pilha de materiais granulares.

É importante destacar, que os resultados apresentados para barreira de vento natural foram obtidos considerando apenas os termos de fonte/sumidouro na equação de quantidade de momento e a turbulência induzida pela vegetação não foi considerada para a modelagem. Observou-se que a introdução do perfil vertical de  $C_i$  melhorou a precisão dos resultados dentro da barreira vegetal, enquanto na esteira os resultados foram subestimados.

Visto que a região de esteira é a área de interesse em estudo de erosão e emissão em pilhas, é importante considerar a dificuldade encontrada pelas modelos de turbulência na predição dessa região. Esta falha pode estar associada a alta energia cinética gerada pelo

atrito do escoamento do vento com a vegetação, que devido não conservação da fonte de turbulência, causa uma dissipação significativa dessa energia na esteira da barreira, resultando na baixa redução da velocidade nesta região.

Assim, concluímos a escolha do modelo de turbulência na predição do escoamento em barreira vegetal é um fato importante, pois influência na precisão dos resultados sendo a região de esteira o local com maior dificuldade predição pelos modelos. Além disso, a utilização da descrição do vertical  $C_i$  permitiu melhor representação da morfologia das plantas e seus efeitos de resistência no escoamento, com boa predição próximo a vegetação, porém, resultados subestimados na esteira da barreira de vento. Como sugestão para melhoria dos resultados nesta região, indica a adição dos termos fonte de turbulência nos modelos de fechamento utilizados na simulação como uma solução.

## 5.2 ESCOAMENTO EM BARREIRAS DE VENTO ARTIFICIAIS

### 5.2.1 Análise da performance dos modelos de turbulência investigados relativamente à predição do coeficiente de resistência inercial

Baseado em trabalhos encontrados na literatura, os modelos de fechamento da turbulência utilizando duas equações,  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST mostraram fornecer os melhores resultados para aplicação de estudos em barreira de vento artificiais (HONG; LEE; SEO, 2015; LIU et al., 2014; SAN; WANG; QIU, 2018; SONG et al., 2014). A boa predição do escoamento em barreira de vento utilizando o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST é destacado na literatura (LIU et al., 2014). Esse modelo apresenta resultados com boa precisão do comportamento do escoamento na superfície e próximo a ela, fundamental para estudo de erosão eólica.

Assim, no presente trabalho, os modelos  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST foram empregados para avaliação da capacidade em reproduzir o comportamento do escoamento ao redor de barreira de vento, com intuito de avaliar a distribuição velocidade de fricção na região de abrigo da barreira porosa e identificar a capacidade de predição e as possíveis limitações dos modelos para o caso em estudo.

Os cenários simulados e avaliados no estudo foram realizados de acordo com o experimental em túnel de vento feito por Dong et al. (2007; 2010).

O coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ) utilizado para modelar o escoamento em meio poroso foi calculado utilizando diferentes equações que expressam a relação do coeficiente com a porosidade da barreira aceitas na literatura (Tabela 5).

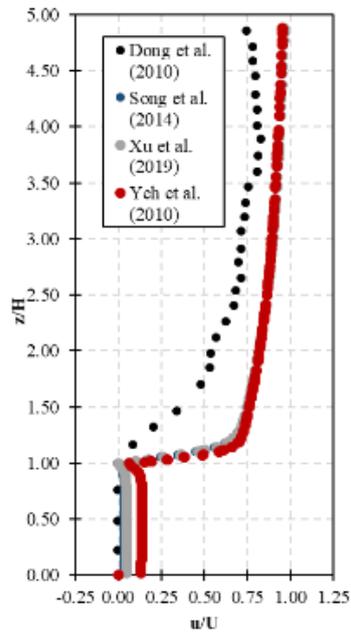
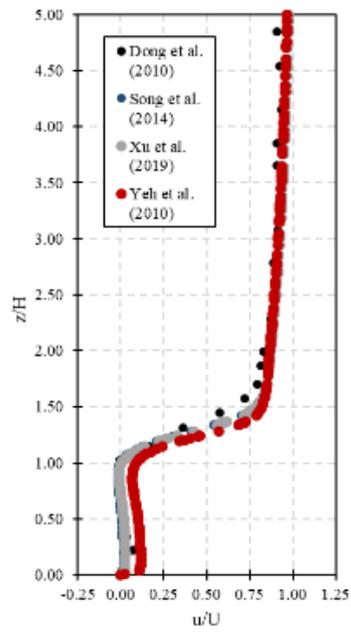
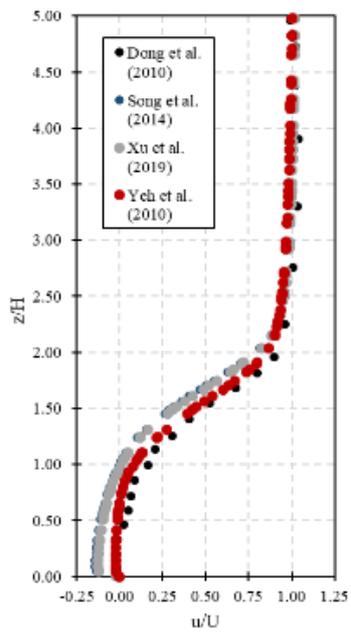
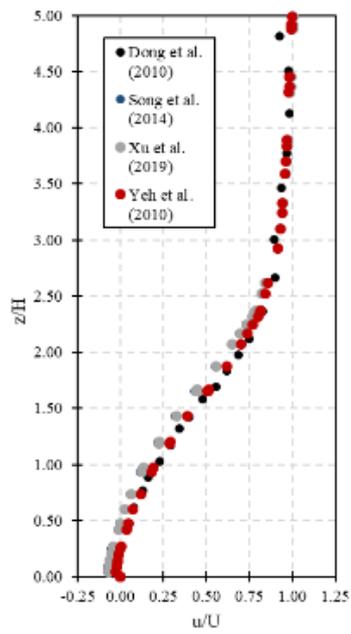
Tabela 5: Comparação do valor do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados por diferentes relação empíricas encontradas na literatura

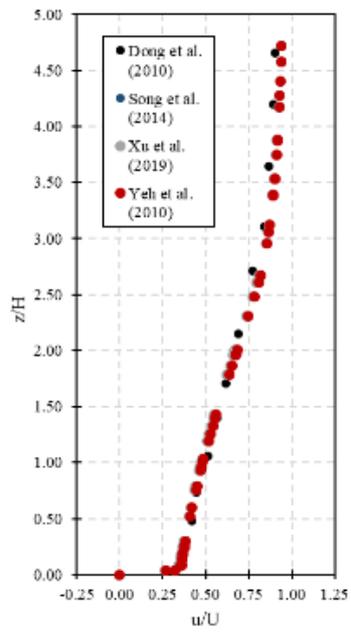
| Estudos            | Equação                                       | Porosidade ( $\beta$ ) |          |         |
|--------------------|---|------------------------|----------|---------|
|                    |   | 20%                    | 40%      | 60%     |
| Song et al. (2014) | $C_i = \frac{1}{c^2} \frac{(\beta^2 - 1)}{1}$ | 520616,41              | 28471,41 | 4284,91 |

|                              |   |           |          |          |
|------------------------------|---|-----------|----------|----------|
| Xu Calay e Mustafa<br>(2019) | $k_r = \frac{0,52 (1 - \beta^2)}{\beta^2}$  | 260000,00 | 14218,75 | 2139,92  |
| Yeh; Tsai; Yang<br>(2010)    | $\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{\rho \omega_1^2}{2}} = \zeta_\phi \frac{1}{\beta^2} + \overline{\epsilon_{0Re}} \zeta_{1KB}$ | 29396,63  | 6751,24  | 2720,459 |

Para a barreira porosa com 80%, a resistência inercial imposta pela barreira foi modelada conforme apresentado na seção 4.1.2, considerando a variação alternada do coeficiente de resistência inercial entre sólido ( $C_i= 100000$ ) e fluido ( $C_i=0$ ) em um perfil perpendicular ao escoamento.

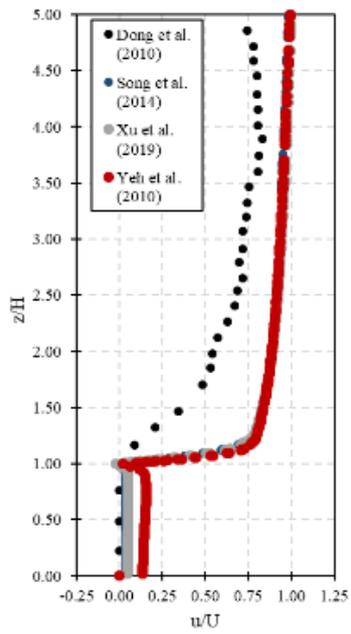
Na Figura 46, na Figura 47 e na Figura 48 são apresentados os resultados da componente horizontal longitudinal (u) da velocidade em função da altura normalizada para diferentes modelos de turbulência e os dados experimentais de Dong et al. (2010). A barreira de vento foi simulada considerando um meio poroso com porosidades ( $\beta$ ) de 20% e 40%. A componente horizontal longitudinal (u) da velocidade foi adimensionalizada pela velocidade da corrente livre ( $u_\infty$ ) igual a 10 m/s. A altura z foi normalizada por H, sendo H a altura da barreira de vento igual a 0,02 m. Os resultados cuja legenda está explicitando os autores Song et al. (2014), Yeh et al. (2010) e Xu et al. (2019) foram simulados no presente trabalho utilizando as equações propostas por tais autores. A legenda Dong et al. (2010) indica os resultados de literatura publicados a partir de medições experimentais.

 $x=0H$  $x=0,5H$  $x=3H$  $x=10H$

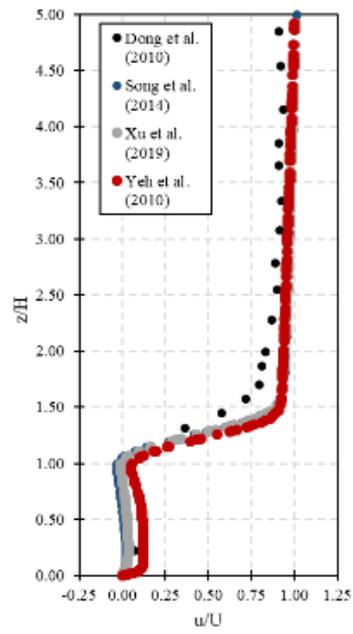


$x=25H$

(a)



$x=0H$



$x=0,5H$

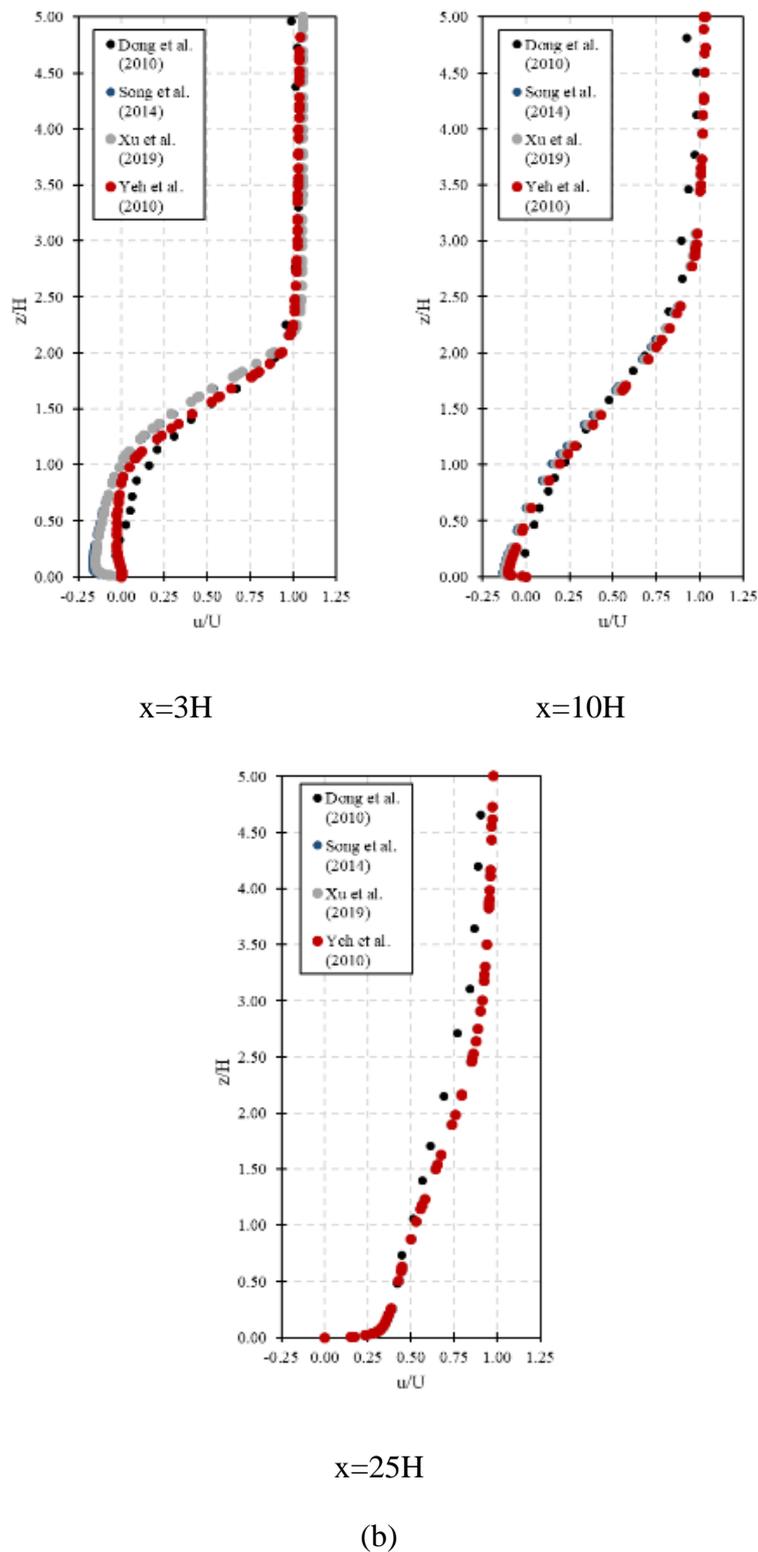
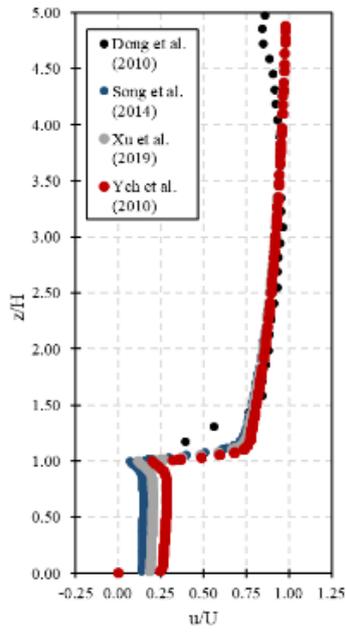
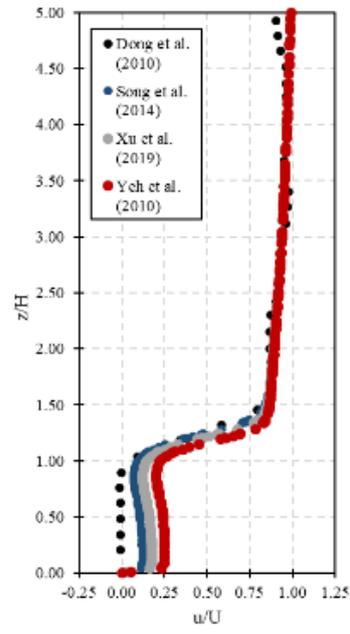


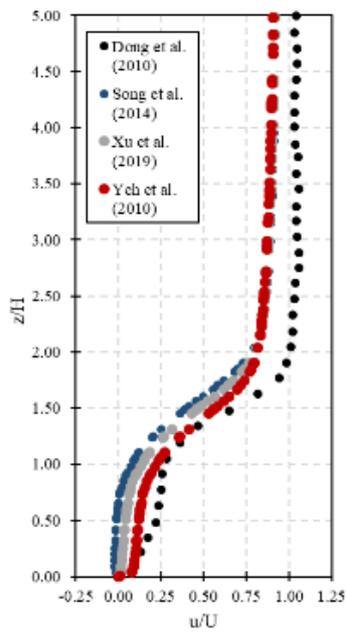
Figura 46: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando as equações propostas Song et al. (2014), Xu Calay e Mustafa (2019) e Yeh; Tsai; Yang (2010) para o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 20% de porosidade.



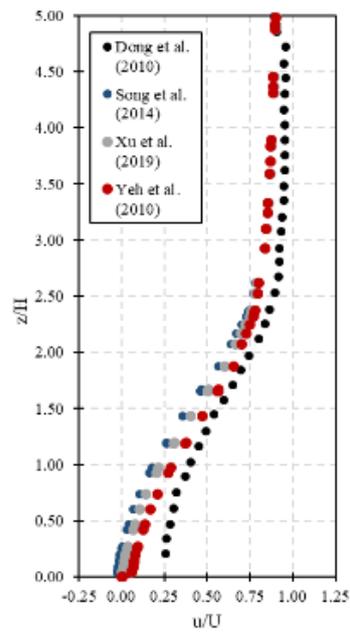
$x=0$



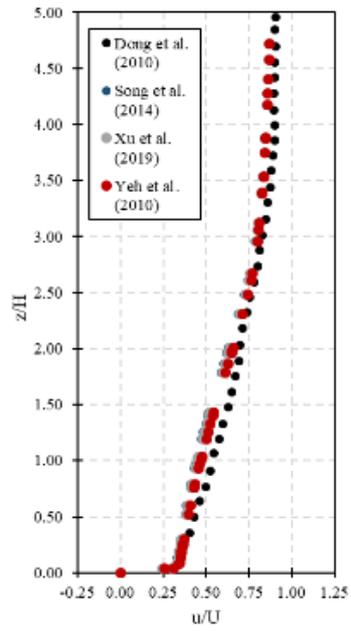
$x=0,5H$



$x=3H$

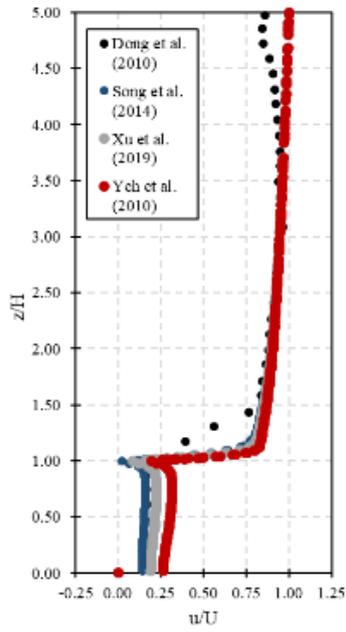


$x=10H$

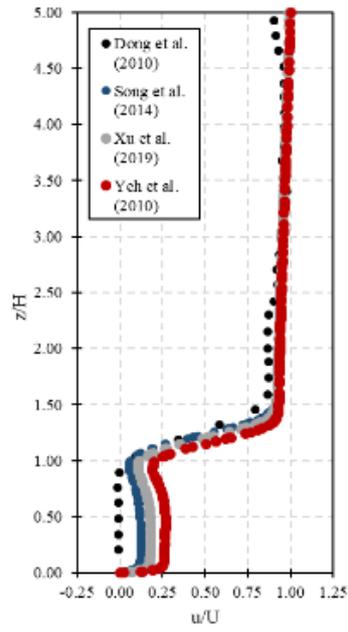


$x=25H$

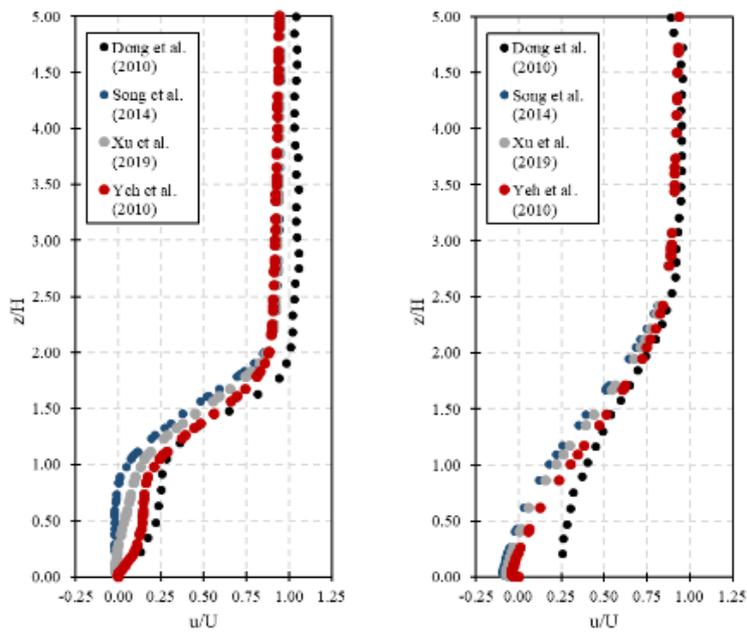
(a)



$x=0H$

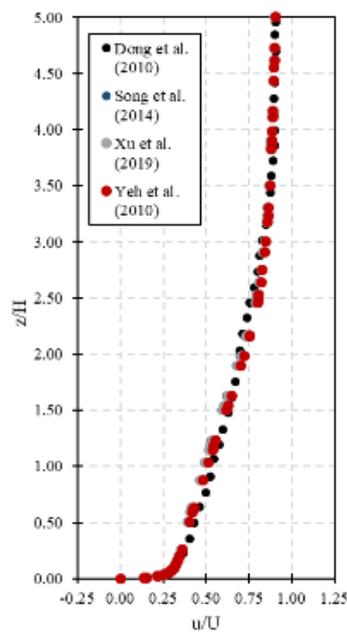


$x=0,5H$



$x=3H$

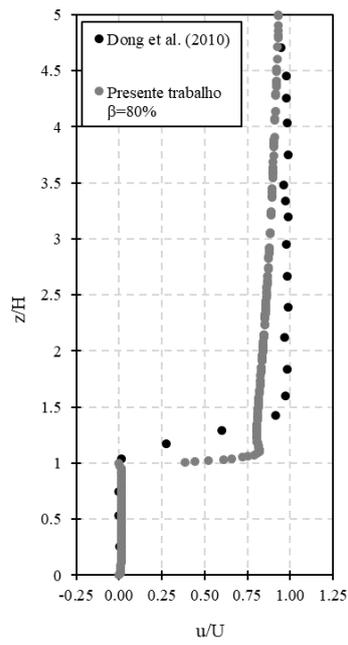
$x=10H$



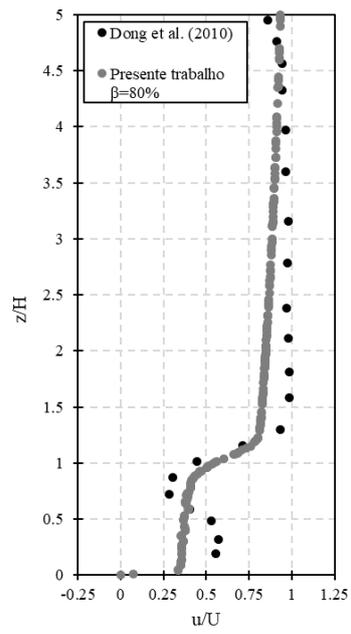
$x=25H$

(b)

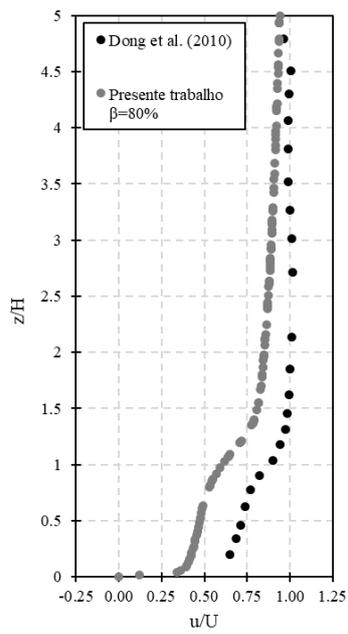
Figura 47: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando as equações propostas Song et al. (2014), Xu Calay e Mustafa (2019) e Yeh; Tsai; Yang (2010) para o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_r$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 40% de porosidade.



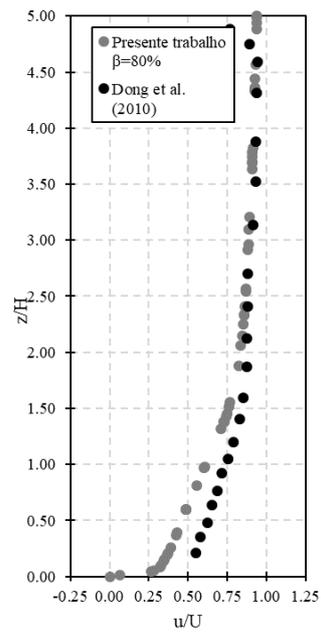
$x=0$



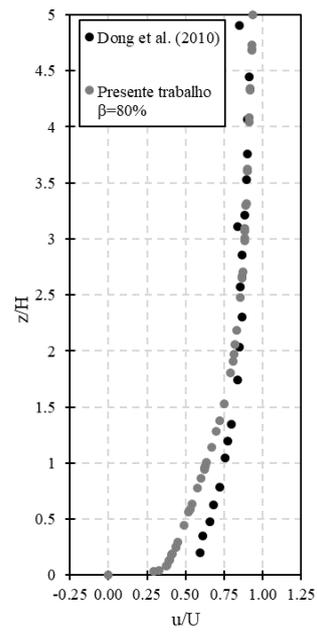
$x=0,5H$



$x=3H$

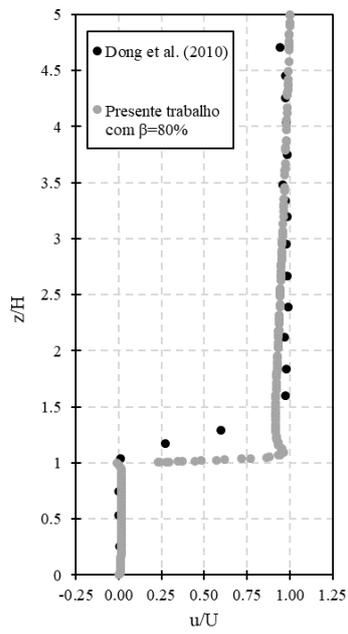


$x=10H$

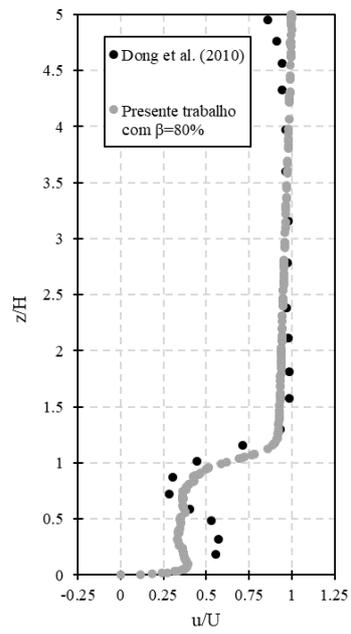


$x=25H$

(a)



$x=0H$



$x=0,5H$

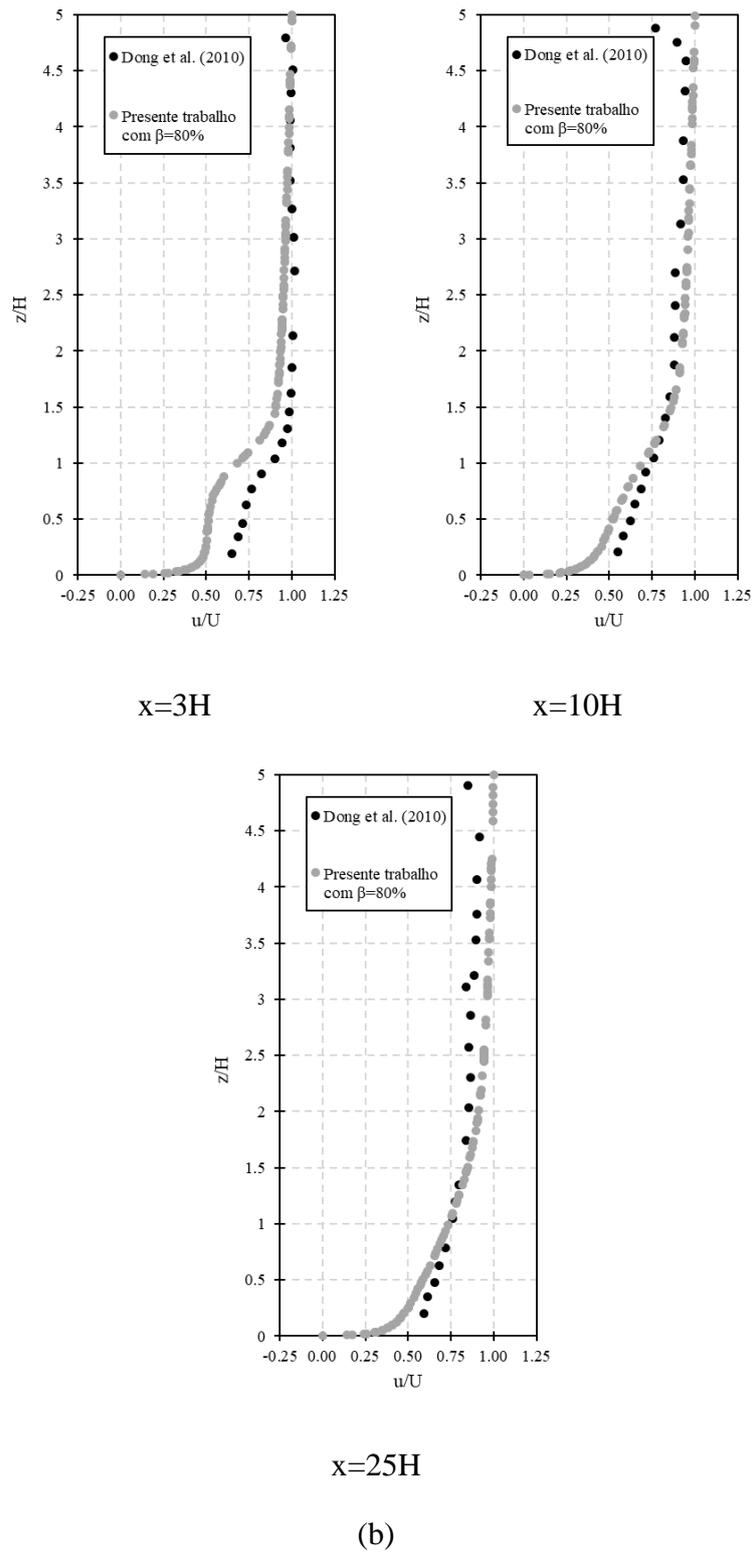


Figura 48: Perfis verticais da componente longitudinal da velocidade estimados utilizando o cálculo do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) calculados com os modelos de turbulência (a)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (b)  $\kappa$ - $\omega$  SST, em uma barreira de vento com 80% de porosidade.

A partir da análise dos gráficos apresentados na Figura 46, na Figura 47 e na Figura 48, observa-se que ambos os modelos resolveram de forma satisfatória o escoamento na barreira de vento, assim constatado devido à boa concordância com os dados experimentais para as porosidades ( $\beta$ ) de 20%, 40% e 80% avaliadas. Para a porosidade  $\beta = 20\%$ , no entanto, é importante destacar que os dois modelos não conseguiram prever com precisão a velocidade em  $x=0$  na região acima da barreira. O escoamento é acelerado fortemente próximo a topo da barreira no modelo, fato que não corresponde ao observado no experimental. No experimento, esse aumento da velocidade ocorre de forma gradativa com o aumento da altura em  $z$ , não sendo expressivo como apresentado pelos modelos. Esse comportamento, porém, é verificado apenas próximo a barreira, pois a medida que o escoamento flui a jusante, a concordância com os dados experimentais melhora.

Para porosidade de  $\beta = 40\%$ , no entanto, ambos os modelos tiveram concordância satisfatória com o experimental, destaque para o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST que apresentou maior precisão nos resultados de velocidade para todos os pontos obtidos, além de prever com acurácia o escoamento nas camadas superiores.

Para porosidade de  $\beta = 80\%$ , ambos apresentaram boa capacidade de predição do escoamento, especialmente em regiões próximas a barreira, como observa-se em  $x=0$ . Destaque para o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST que forneceu os melhores resultados na região abaixo da altura da barreira, bem como no escoamento livre a acima dessa. Este comportamento é observado nos demais pontos medidos na esteira, pois apesar de também subestimada a velocidade média em alguns pontos, o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST apresentou maior precisão considerando o eixo  $z$  (vertical) e o eixo  $x$  (longitudinal).

Outra análise a ser realizada, é avaliar o impacto das diferentes relações empíricas encontradas na literatura para calcular o coeficiente de resistência inercial em barreira de vento artificiais. Observa-se que apesar dos valores calculados para o coeficiente de resistência serem muito diferentes em algumas porosidades, com ordens de grandeza diferentes, os resultados do comportamento do escoamento expresso na velocidade não apresentaram importantes variações. No geral resultou em variações pequenas nos resultados das medições da velocidade do escoamento, como pode ser visto nos gráficos da Figura 46 e da Figura 47 do perfil vertical da componente horizontal longitudinal da velocidade.

Nota-se que as equações de Song et al. (2014) e Xu Calay e Mustafa (2019) forneceram os melhores ajustes no cálculo da velocidade próximo da barreira, na região da esteira próxima, enquanto a equação de Yeh; Tsai; Yang (2010) obteve melhor concordância com os dados para regiões da esteira afastada. Observa-se, porém, que a influência das relações fica menor a medida que  $x$  aumenta a jusante da barreira. O que é esperado pois a medida que se afasta, menor é a influência da barreira no comportamento do escoamento, assim, a influência do coeficiente também deverá diminuir e o perfil de velocidade voltar as características iniciais a montante da barreira.

Esta variação expressiva dos valores de  $C_i$  calculados para porosidades iguais, pode estar relacionada a geometria dos poros da barreira de vento, ou seja, a geometria da tela da barreira artificial. Li e Sherman (2015) destacam em sua revisão, que porosidades iguais podem ser encontradas em barreiras com tipos de poros com geometrias diferentes. Segundo a literatura as aberturas de arestas vivas têm maiores coeficientes de resistência do que as aberturas redondas suaves. Essa diferença da geometria dos espaços vazios (poros), não altera apenas o coeficiente de resistência, mas influencia o comportamento da redução da velocidade a jusante da barreira. Os autores encontraram que barreiras porosas com mesma porosidade (45% a 46%) e diferentes geometrias de poros apresentaram importante variação na redução da velocidade na esteira próxima.

Além dos resultados dos perfis verticais de velocidade das componentes horizontal longitudinal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ), Dong et al. (2010) fornece medições o campo de energia cinética turbulenta (do inglês *Turbulent Kinect Energy* - TKE) ao redor de uma barreira de vento para diferentes porosidades. Estes dados estão apresentados na Figura 49 e na Figura 50, comparados com os contornos de TKE obtidos em CFD com modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST utilizando a equação empregada por Xu, Calay e Mustafa (2019). Na Figura 51, os contornos de TKE obtidos em CFD com modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST são comparados as medições o campo de energia cinética turbulenta obtidos por Dong et al. (2010).

Os dados de TKE fornecido pelo experimental mostram que os níveis maiores de energia cinética turbulenta são encontrados a jusante, acima do topo da barreira porosa para ambas as porosidades ( $\beta=20\%$  e  $40\%$ ). Para  $\beta=20\%$  níveis elevados de TKE estão localizados na esteira da barreira, aproximadamente acima da região de recolamento ( $x$

$<12$  e  $z >1$ ). Comparando aos dados experimentais, observa-se que os modelos tiveram boa concordância, pois apresentam níveis maiores de TKE concentradas camadas superiores da barreira (entre  $1H$  e  $1,5H$ ) e valores insignificantes a jusante dela na esteira afastada. Resultados semelhantes foram encontrados por San, Wang e Qiu (2018) em estudo numérico e Lee e Kim (1999) no experimental em túnel de vento, onde níveis de TKE relativamente altos foram observados na camada superior a barreira porosa ( $1,0 > z/H > 1,5$ ), causado devido à forte mistura turbulenta nesta região proveniente do escoamento acelerado no topo da barreira.

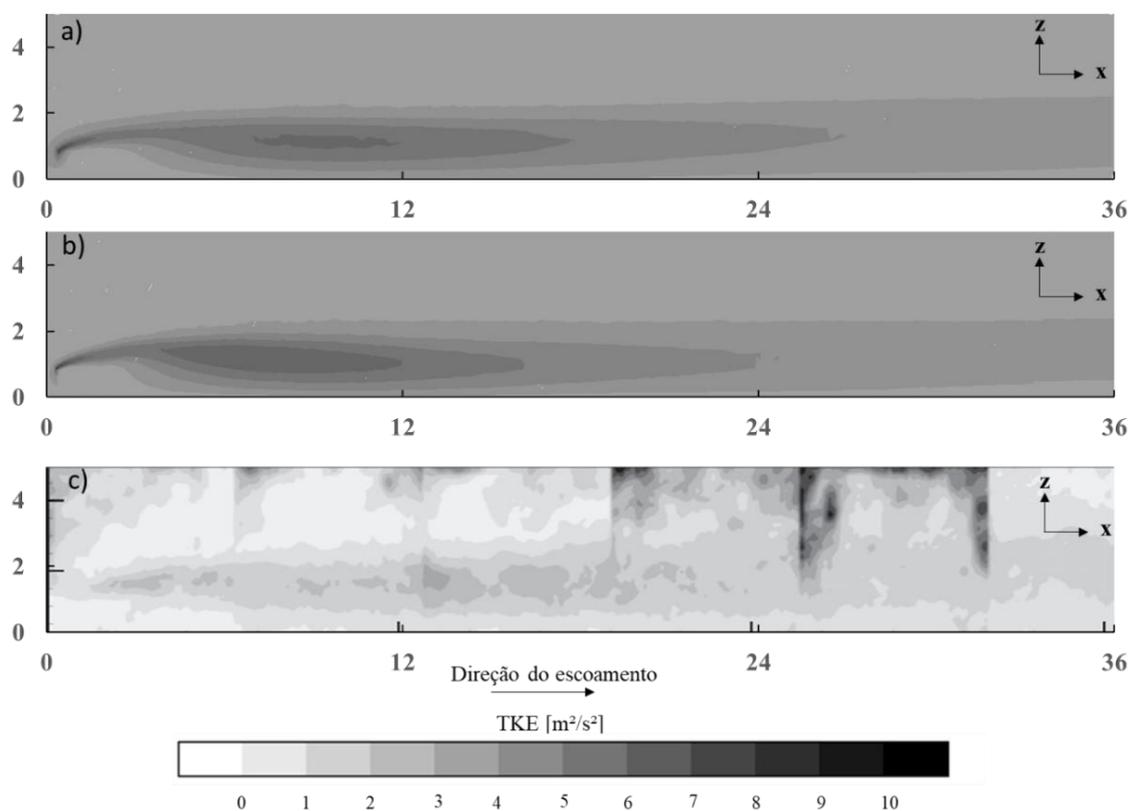


Figura 49: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 20% de porosidade no plano  $xz$  em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST (b) comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c).

Observa-se também que os modelos apresentam pequenas diferenças na distribuição de TKE ao redor da barreira. O  $\kappa$ - $\omega$  SST apresenta níveis relativamente mais altos de TKE distribuído ao longo da esteira da barreira ( $4 < x/H < 12$ ) e níveis menores que se estende a longas distâncias ( $x=24H$ ). No Realizável, apesar de mostrar alto TKE, este ficou concentrado em  $x$  entre  $8H$  e  $12H$  na esteira próxima da barreira e a influência de TKE ultrapassa  $24H$  com baixo valor de TKE. Neste ponto de altos níveis de TKE na esteira é observado a transferência de quantidade de movimento das camadas superiores em

direção a superfície, onde é observada uma forte zona de mistura (zona E descrita na seção 3.1) com importante variação dos gradientes de velocidade entre as camadas do escoamento na superfície e a parcela que passa sobre a barreira de vento.

Para  $\beta=40\%$ , entretanto, os modelos apresentaram maior semelhança dos resultados entre eles, bem como concordaram satisfatoriamente com os dados experimentais. Os valores máximos de TKE são encontrados próximo de  $x/H=12$ . Diferença significativa do resultado encontrado por Lee e Kim (1999), onde a energia cinética turbulenta máxima ocorreu a distância de  $x/H < 0,5$  da barreira.

Outro resultado importante foi a diferença observada na distribuição de TKE ao redor das barreiras porosas considerando diferenças equação para a parametrização do coeficiente de resistência  $C_i$ . A variação do coeficiente calculado influenciou os resultados do campo de TKE na esteira próximo e afastada da barreira. Destaque para a equação utilizada por Yeh; Tsai; Yang (2010) que apresentou os menores valores de TKE em toda área de influência da barreira.

O aumento da porosidade reduziu a aceleração do escoamento que ocorre no topo da barreira, com isso, houve uma redução dos gradientes de velocidade e conseqüente a redução da TKE nas camadas superiores que resulta em menores níveis de TKE nas esteiras próximas e afastadas.

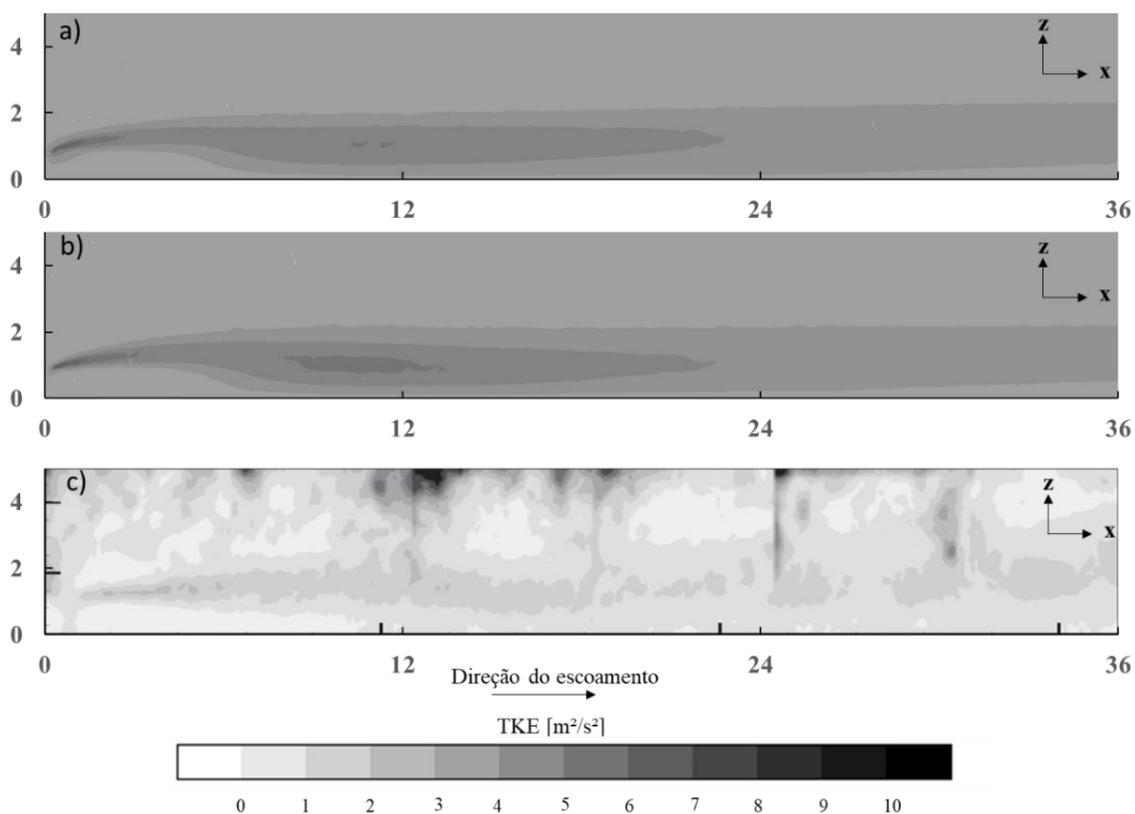


Figura 50: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 40% de porosidade no plano  $xz$  em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c).

Para  $\beta=80\%$ , a localização dos maiores níveis de TKE é alterada, passando da região acima da barreira para uma pequena região concentrada longo atrás dessa. Esta região é caracterizada por alta intensidade da turbulência e do campo de velocidade, uma vez que a porosidade é significativamente grande, permitindo a passagem de grande quantidade de movimento pela área da barreira porosa. Além disso, observa-se resultados semelhantes entre os modelos e que concordam satisfatoriamente com os resultados encontrados no experimental de Dong et al. (2010).

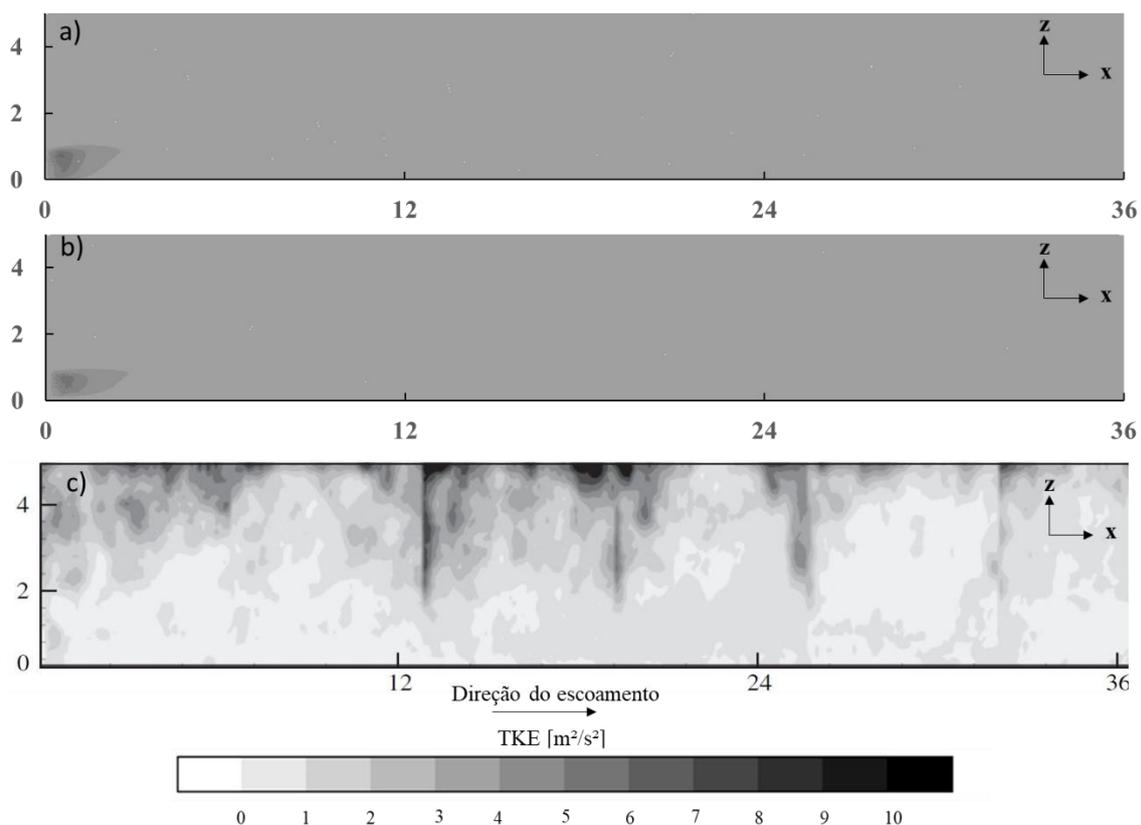


Figura 51: Contorno de energia cinética turbulenta do escoamento ao redor de uma barreira de vento com 80% de porosidade no plano  $xz$  em  $y=0,25$  calculados pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c).

A vorticidade também é calculada e foi usada para avaliação e validação dos resultados numérico no presente trabalho. A Figura 52, a Figura 53 e Figura 54 mostram a vorticidade calculada numericamente (a e b) e compara com o resultado experimental obtido por Dong et al. (2010). O cálculo da vorticidade mostra a direção de rotação do escoamento. A vorticidade negativa representa uma rotação do escoamento no sentido horário, enquanto a vorticidade positiva representa uma rotação no sentido anti-horário em relação ao modelo simulado.

O aumento da porosidade rediziu a frequência dos vórtices que se formam no topo da barreira de vento, provenientes do desprendimento do escoamento neste ponto da barreira, sendo posteriormente levados na direção a esteira afastada.

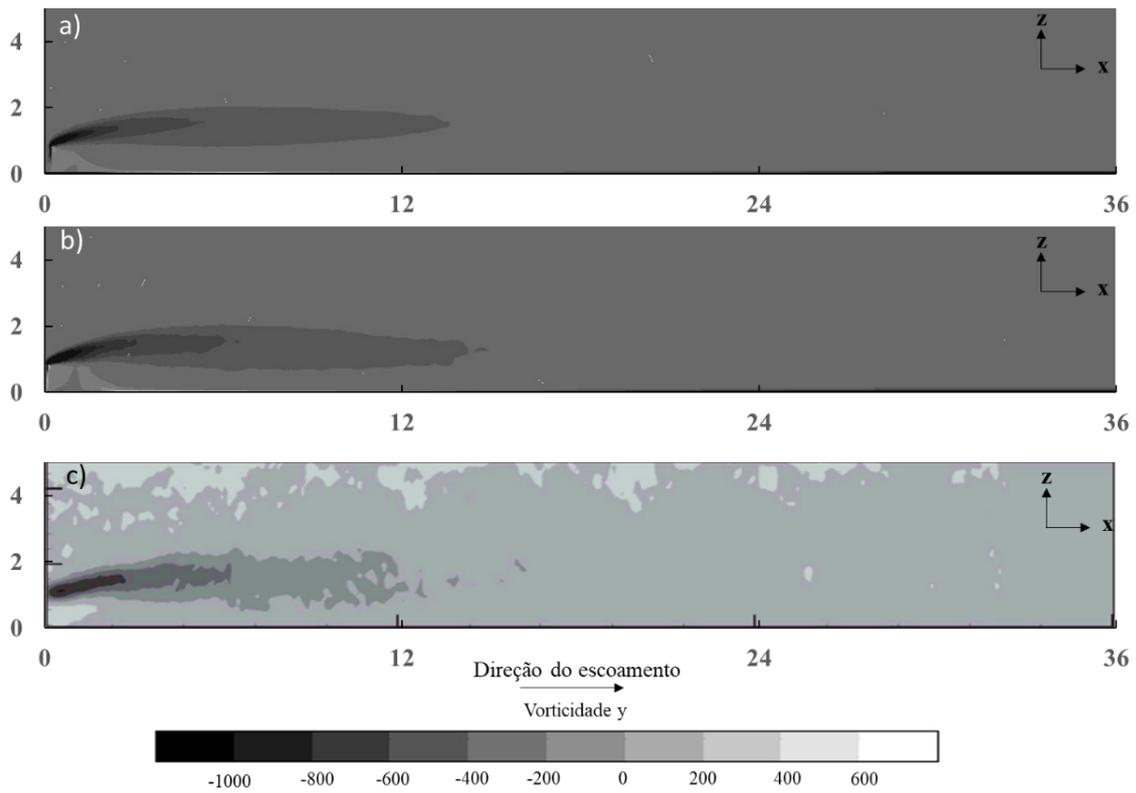


Figura 52: Resultado da vorticidade calculada em  $y$  no plano  $xz$  em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 20% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c)

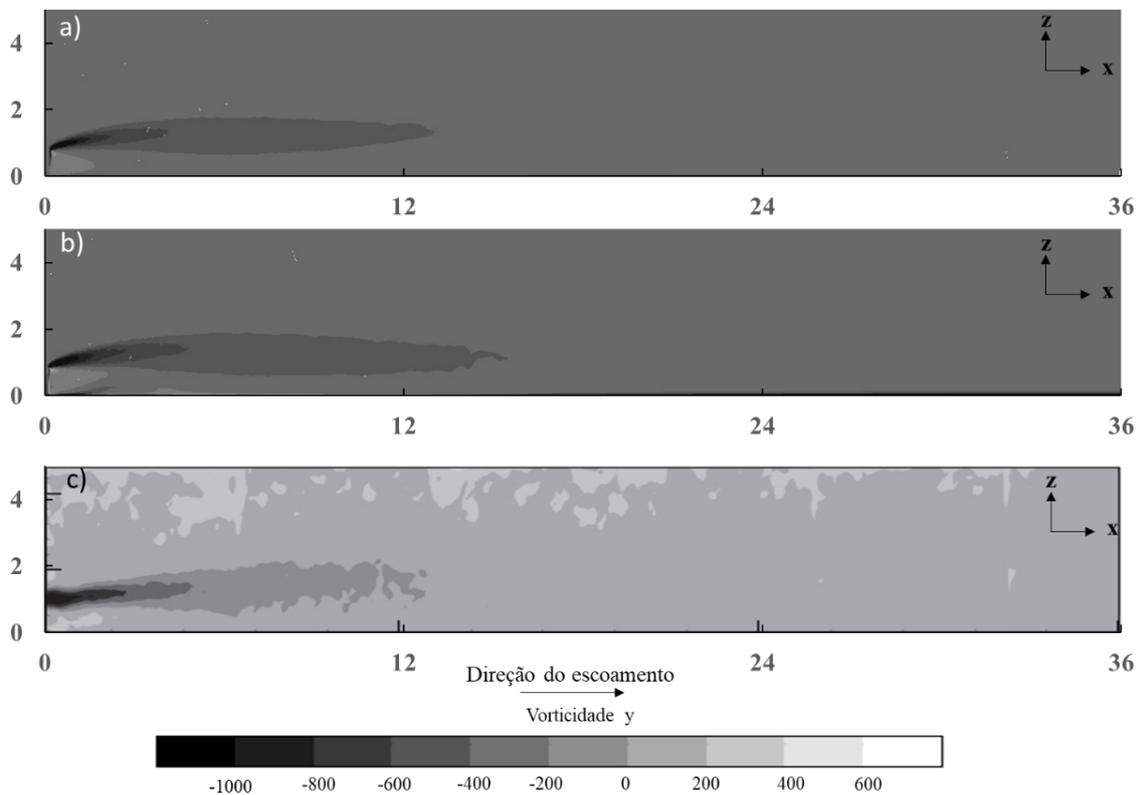


Figura 53: Resultado da vorticidade calculada em  $y$  no plano  $xz$  em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 40% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c)

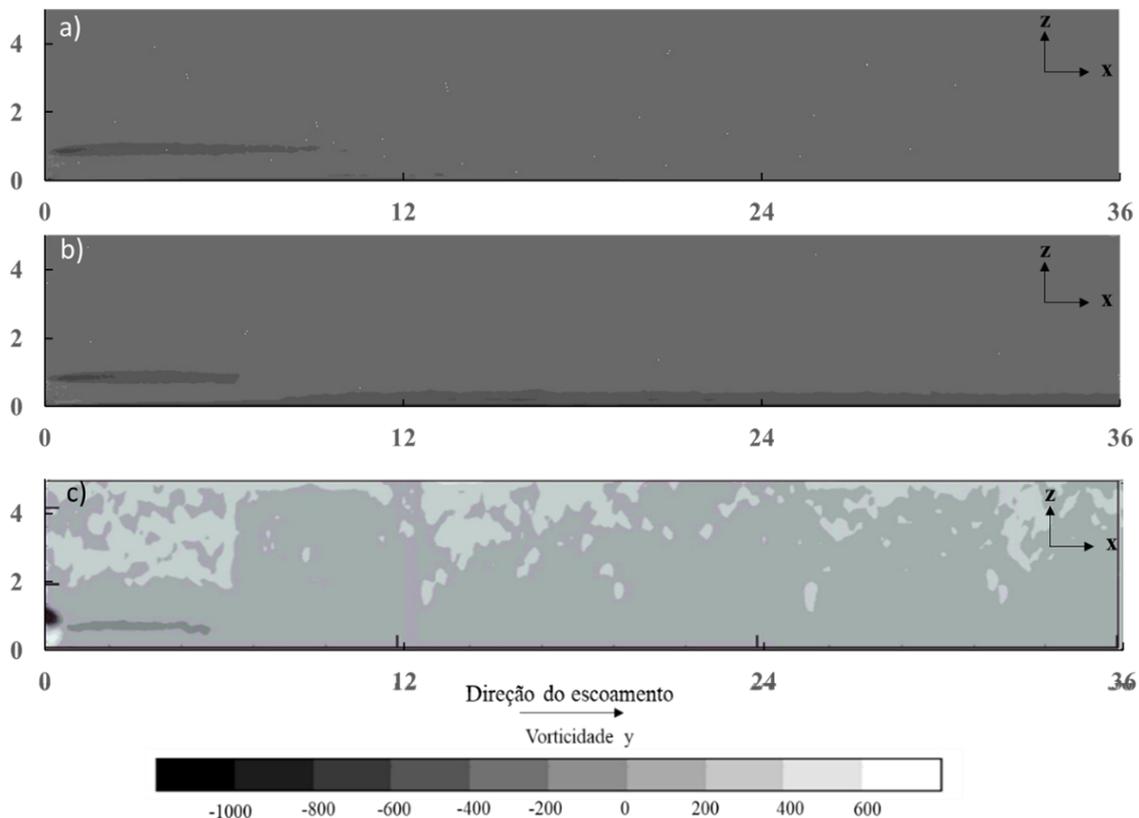


Figura 54: Resultado da vorticidade calculada em  $y$  no plano  $xz$  em  $y=0,25$  do escoamento em uma barreira de vento com 80% de porosidade obtido pelos modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável (a) e  $\kappa$ - $\omega$  SST comparados aos dados experimentais de Dong et al 2010 (c).

Nota-se altos níveis de vorticidade negativa logo acima do topo da barreira e essa vorticidade é reduzida à medida que se afasta da barreira na parte superior, enquanto que uma vorticidade positiva é verificada em uma pequena região atrás da barreira porosa. Os resultados simulados apresentaram uma boa concordância com os dados obtidos no experimental. Destaque para o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST que fornece maior concordância, sendo qualitativamente preciso no tamanho e distância das regiões com maiores níveis de vorticidade negativa.

### 5.2.2 Efeito da porosidade na velocidade superficial em terrenos planos a jusante de uma barreira artificial

Foi avaliado o efeito da variação da porosidade no comportamento do escoamento a jusante de uma barreira porosa e sua implicação no resultado da velocidade superficial

em terrenos planos. O efeito da redução da velocidade na velocidade superficial foi avaliado considerando três diferentes porosidades, as quais foram 20%, 40% e 60%. Os valores das porosidades foram escolhidos baseado em estudo da literatura que indicam o intervalo entre 20 a 50% como valores de porosidade ideais (CONG et al., 2013; DONG et al., 2007; LEE; PARK, 2000; YEH; TSAI; YANG, 2010).

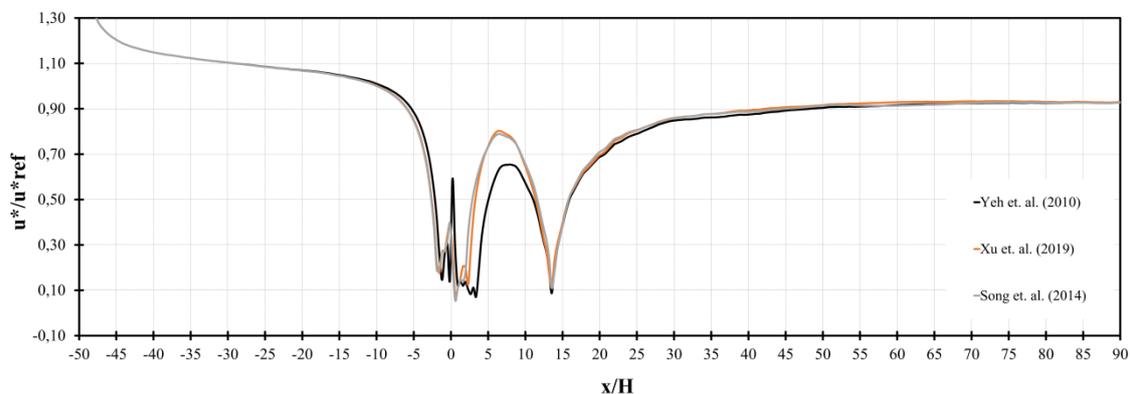
A Figura 55 até a Figura 57 mostram os resultados da simulação em CFD do escoamento desenvolvido ao redor de uma barreira porosa, que foi realizada utilizando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST. As linhas de corrente do comportamento do escoamento e os efeitos da modificação da velocidade causada pela barreira podem ser observados na velocidade de fricção normalizada plotada na superfície ao longo de todo o domínio. A velocidade de fricção foi normalizada pela  $u_{*ref}$ , velocidade de fricção obtida numa região não perturbada pela barreira. Os valores da velocidade de fricção de referência foram de 0,37 m/s e 0,41 m/s para os modelos de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST, respectivamente.

A montante da barreira a velocidade de fricção é determinada pela característica da rugosidade da superfície e as condições do escoamento médio. O escoamento ao incidir na barreira de vento resulta na formação de uma região com velocidade de fricção reduzida. A montante, o escoamento ao incidir na barreira, sofre uma redução brusca da velocidade que gera região com baixos níveis de tensão de cisalhamento e formação de uma zona protegida com baixos níveis de velocidade de fricção (Figura 55). A jusante, o escoamento de jato, formado devido a passagem do vento pelos poros da barreira, tem velocidade reduzida, gerando uma zona de calmaria com baixos níveis de cisalhamento, que resulta numa velocidade reduzida na superfície. Esta região se estende a jusante da barreira a distância que varia de acordo com diversos fatores como velocidade, altura da barreira e principalmente a porosidade (BASNET; CONSTANTINESCU, 2019; CHEN et al., 2012; DONG et al., 2007).

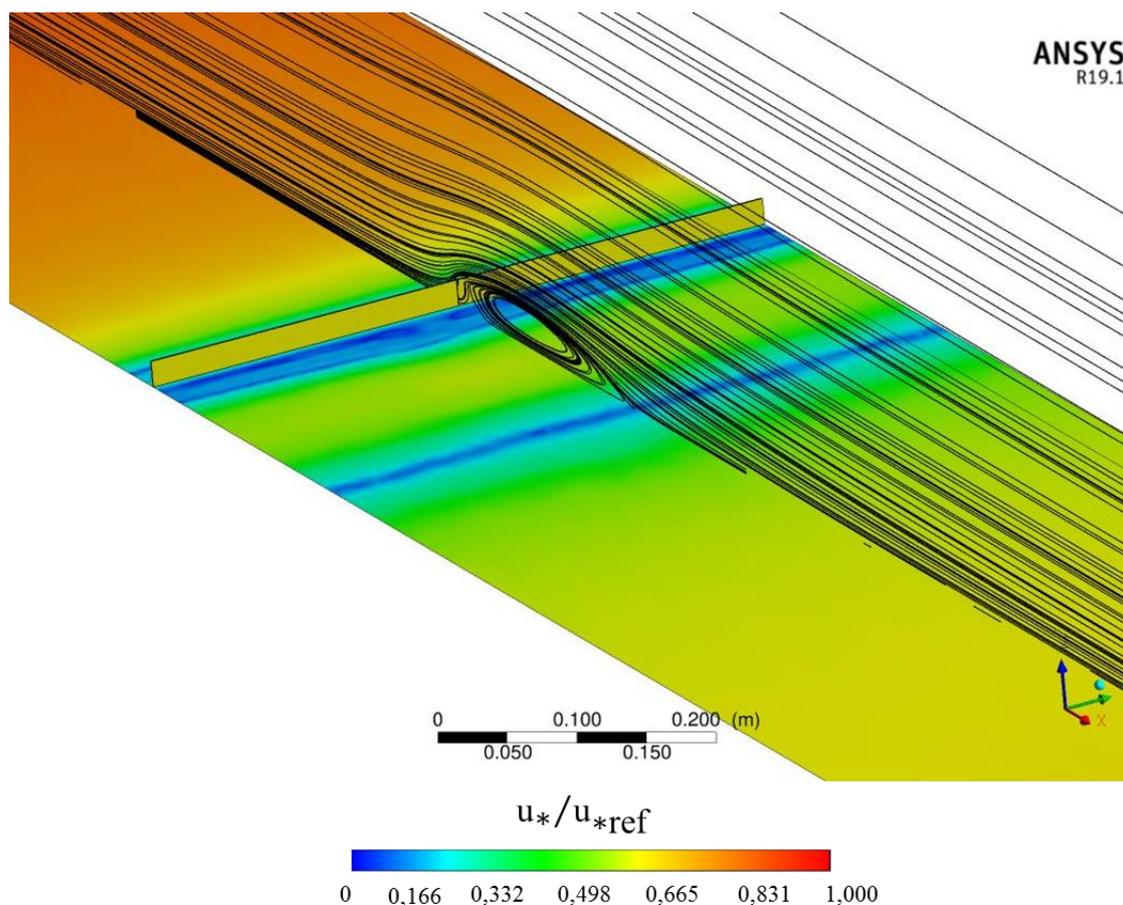
A velocidade mínima do vento  $U_m/U_0$  é frequentemente adotada como um parâmetro importante para avaliar o grau de redução da velocidade do vento. Segundo Bean, Aaperi; Federer (1975), o ponto de velocidade mínima do escoamento a jusante da barreira ocorre pouco antes do escoamento do vento se transferido para superfície e interagir com a parcela de fluido que atravessa os poros da barreira. A localização desse parâmetro varia em função da porosidade, onde em barreira de vento sólida ( $\beta=0$ ),  $U_m$  ocorre

imediatamente a jusante da barreira, enquanto que para porosidades médias e altas, ele ocorre cerca de  $3H - 5H$  da barreira de vento (LI; SHERMAN, 2015). Resultado semelhante foi encontrado para a porosidade de 20% e 40 %, onde o valor da velocidade de fricção mínima está localizado em  $x > 5H$ .

Ao se afasta a jusante da barreira, observa-se uma região de escoamento reverso, essa é uma região caracterizada baixas velocidade e intensa turbulência. A recirculação presente nesta zona eleva os níveis de cisalhamento gerando uma área com velocidade de fricção maior, especialmente na região onde está localizado o centro da recirculação, como pode ser visto na Figura 55 para a barreira com porosidade de 20%. Posteriormente, uma segunda região com níveis baixos de velocidade de fricção é observada próximo ao ponto onde o escoamento recola na superfície e então a velocidade é retomada, como é observado na velocidade de fricção que volta a aumentar, porém, com valores muito inferiores aos encontrados no escoamento a montante da barreira, configurando assim a redução da velocidade e proteção de área localizadas a jusante dessa.



(a)

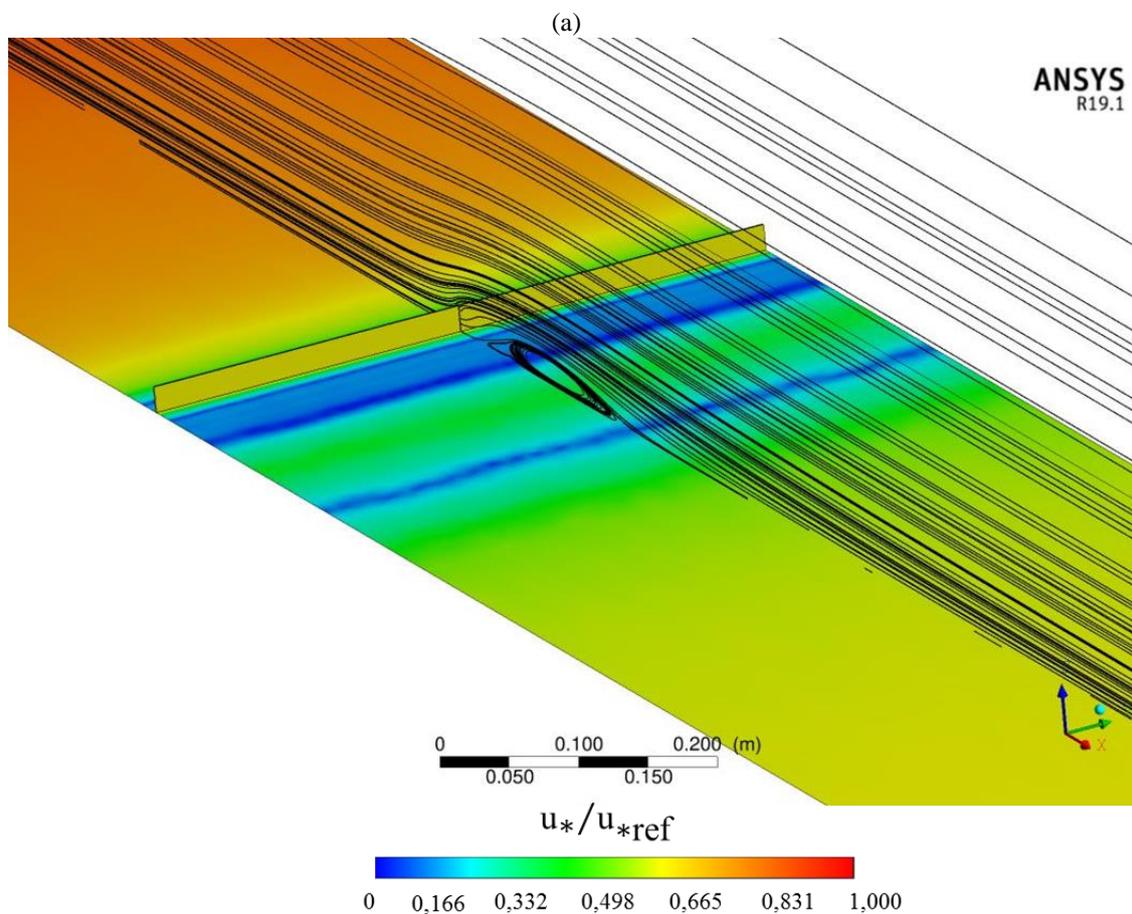
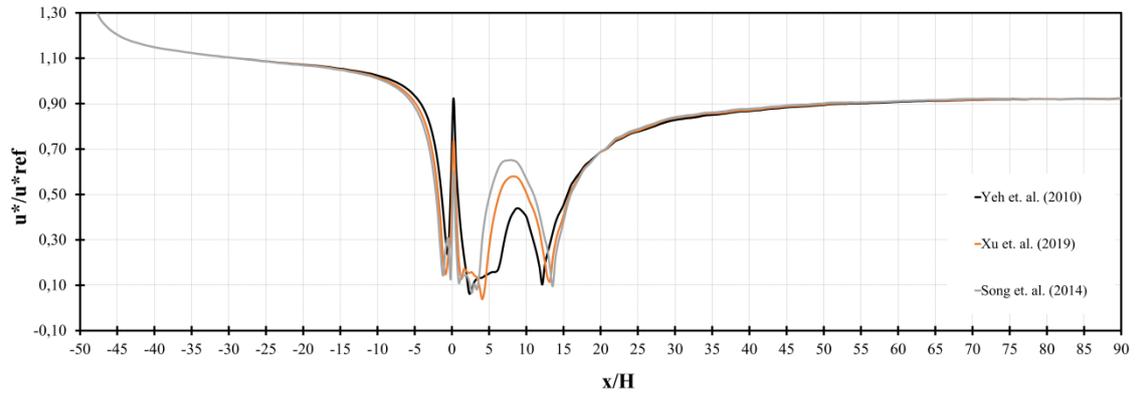


(b)

Figura 55: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 20% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019).

Com a mudança da porosidade de 20% para 40%, observa-se um incremento da região com velocidade de fricção reduzida, uma diminuição da recirculação formada a jusante e da velocidade de fricção na zona de esteira próxima em relação aos resultados para a porosidade de 20%. Basnet e Constantinescu (2017, 2019) encontraram semelhante comportamento para o escoamento médio em uma barreira com 36% de porosidade com o modelo LES, exceto o aumento da velocidade de fricção apresentado antes do ponto de recolamento. Esta diferença pode ser devido a diferença de geometria entre as barreiras simuladas no presente trabalho e pelo modelo LES. A formação da região de recirculação na esteira próxima aumenta o cisalhamento do escoamento nesta região, resultando no incremento do valor da velocidade de fricção neste ponto, enquanto no estudo de Basnet

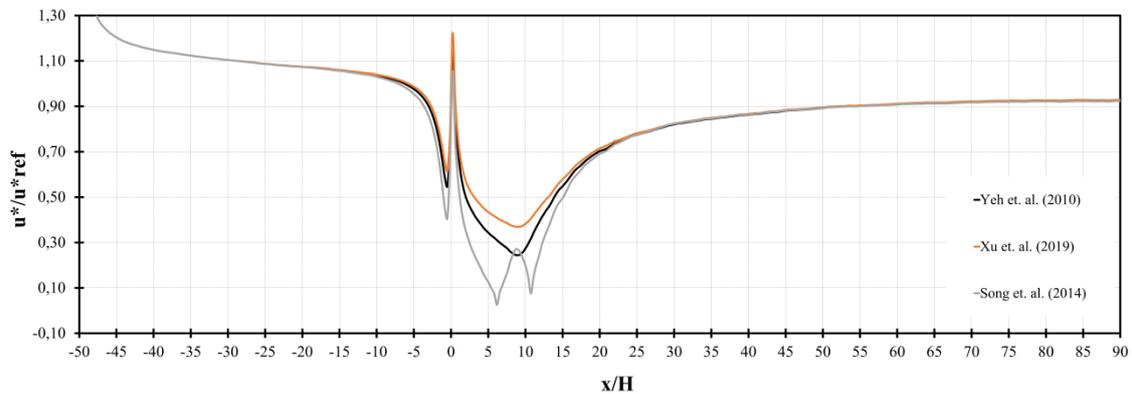
e Constantinescu (2017) o escoamento é dominado pelo escoamento que passar pelos poros da barreira.



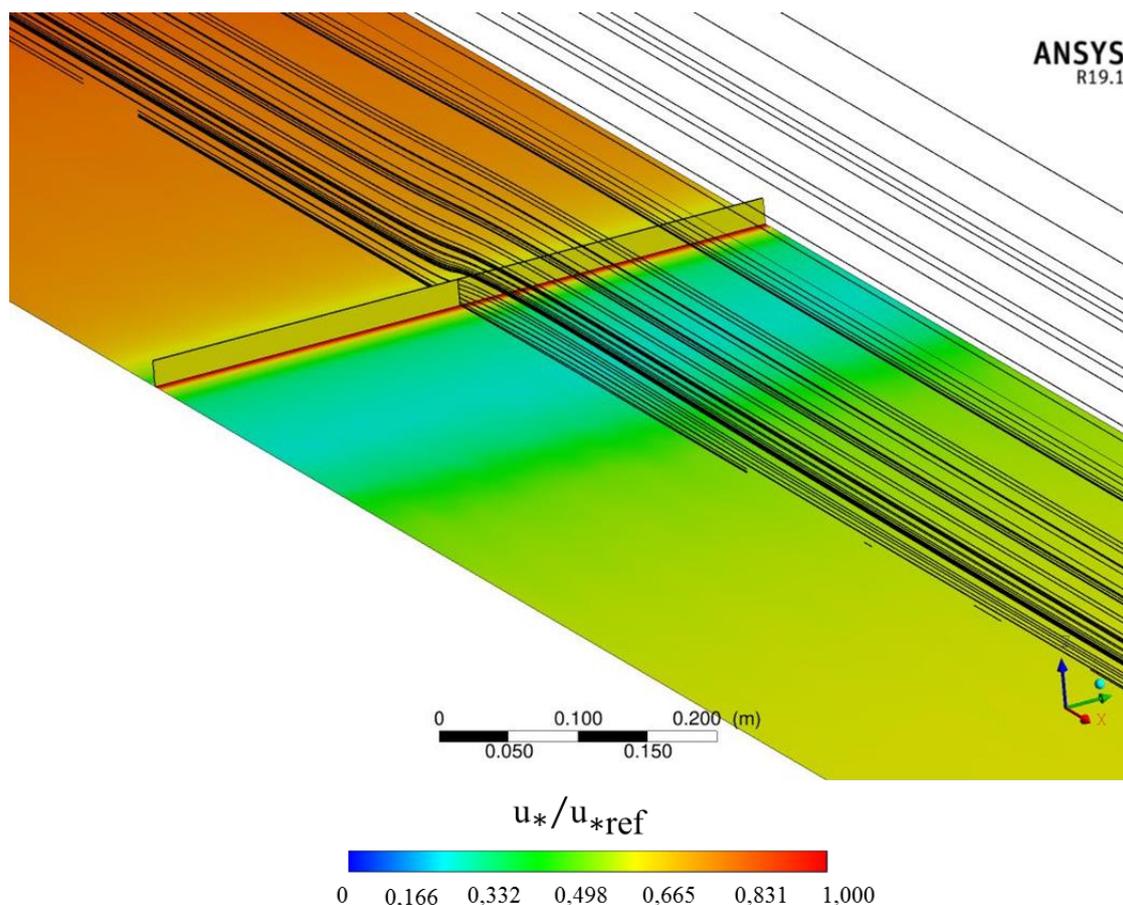
(b)

Figura 56: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 40% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019).

Para a barreira com 60% de porosidade, o escoamento reverso desaparece completamente e o *bleed flow* domina, resultando na redução entorno de 20% da velocidade de fricção na região a jusante da barreira em relação aos valores verificados a montante. Observa-se que a porosidade influenciou na redução da velocidade de fricção, o aumento da porosidade reduziu o percentual de redução da velocidade de fricção efetuado pela barreira de vento. Essa redução foi em média de 32% menor quando a porosidade aumentou para  $\beta=0,6$ . É importante destacar a variação da localização do  $u^*$  mínimo, o aumento da porosidade deslocou o local da menor velocidade de fricção de  $x=3H$  para mais distante da barreira  $x=10H$ , o que resultou em uma região maior com redução da velocidade e melhor proteção, pois não há a formação de recirculação que aumenta a turbulência e causa a elevação da velocidade de fricção.



(a)



(b)

Figura 57: Distribuição da velocidade de fricção obtida (a) em  $y=0$ , na linha central do domínio de estudo, para três diferentes equações utilizadas para no cálculo do coeficiente de resistência inercial, Song et. al. (2014) – linha cinza, Xu et. al. (2019) – linha vermelha e Yeh et. al. (2010) – linha preta, acompanhada do contorno da velocidade de fricção calculados para (b) uma barreira artificial porosa com 60% de porosidade utilizando a equação de Xu et. al. (2019).

É importante destacar que apesar das relações empíricas testada não revelarem impactos significativos nos resultados dos perfis de velocidade medidos, elas mostraram variações nos resultados calculados de energia cinética turbulenta e vorticidade, bem como afetou os resultados da distribuição da velocidade de fricção. Considerando as diferentes equações usadas para calcular o coeficiente de resistência  $C_i$ , observa-se uma diferença de 13%, 29% e 25% na velocidade de fricção calculada em  $0 < x/H < 15$  para  $\beta = 0,2$ ; 0,4 e 0,6, respectivamente.

Outro importante ponto a ser destacado é que os níveis de velocidade de fricção calculado pelos modelos de turbulência também apresentaram diferenças. O modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável apresentou velocidade de fricção a montante menor (0,37 m/s), zona de convergência maior onde o recolamento ocorre a uma distância maior em relação aos resultados do  $\kappa$ -

o SST e o nível de redução gerado pelas barreiras foi menor (aproximadamente 5%), retornando a mesma magnitude a 20H a jusante.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 6.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi estudado o escoamento atmosférico turbulento em condições de atmosfera neutra para diferentes tipos de barreira de vento (natural e artificial), tendo como objetivo avaliar a redução da velocidade do escoamento e a formação da região de abrigo a jusante da barreira utilizando diferentes métodos de implementação na modelagem numérica. O modelo matemático utilizado é baseado nas equações de conservação da massa e quantidade de movimento utilizando o Método de Volumes Finitos para solução das equações diferenciais de transporte. Dados experimentais em túnel de vento obtidos por Miri, Dragovich e Dong (2017) foram utilizados para validação dos resultados da simulação do escoamento em barreira de vento natural, enquanto os dados de Dong et al. (2007, 2010) foram utilizados para a validação da simulação do escoamento em barreiras artificiais porosas. As principais conclusões obtidas são listadas abaixo seguindo os objetivos propostos.

#### Escoamento em barreira natural

##### *Sobre a escolha do modelo de turbulência*

- Não houveram significativas modificações no comportamento do escoamento, que tenha alterado a distribuição do coeficiente adimensional de redução da velocidade. Os resultados avaliados mostraram-se semelhantes (quando avaliada a tendência dos perfis) independente do modelo de turbulência utilizado, porém, a intensidade entre eles em alguns pontos (essencialmente no interior da barreira) apresentou um percentual de diferença que variou ao longo dos perfis medidos. O resultado médio da diferença entre os modelos de turbulência foi de 12% para média e alta densidade e 34 % para baixa densidade;
- Os modelos mostraram melhor predição do escoamento no interior da barreira, enquanto na parte final e na esteira próxima (até 5H após as árvores) da barreira vegetal tiveram dificuldade na predição do escoamento. Os resultados do coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  foram subestimados nesta região de esteira pelos modelos. Não foram encontrados dados experimentais do campo de velocidade a uma distância maior na esteira;

- O modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável mostrou-se sutilmente melhor quando avaliada a concordância com os dados experimentais, especialmente na predição do escoamento dentro da região da barreira. Entretanto, foi o que maior subestimou os resultados do coeficiente de redução  $R(x,z)$  na esteira. Resultado importante a ser considerado, visto que a região de esteira é o local de maior interesse na proteção da erosão eólica na superfície do solo e em pilhas de materiais granulados nos pátios de estocagem;

*Sobre a influência do espaçamento entre árvores (densidade de área plantada ou densidade da barreira)*

- A variação da densidade da área plantada mostrou maior influência para o aumento da densidade quando passou de baixa para média densidade, do que média para alta densidades. Os resultados numéricos obtidos para média e alta densidade de barreira foram mais semelhantes que quando comparados aos resultados obtidos para baixa densidade, como também observado nos experimentos em túnel de vento;

*Sobre a influência do valor máximo do coeficiente de resistência inercial  $C_i$  ( $LAD * C_D$ )*

- O valor máximo do coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ) utilizado na estratificação vertical apresentou maior influência dentro da região de barreira (na horizontal) e no dossel (na vertical). Na proporção que se afasta dessas regiões, sua influência reduz chegando a valores semelhantes do campo de velocidades;
- O valor do  $C_i$  apresenta maior influência nas menores densidades, enquanto em densidade maiores, o efeito da resistência individual da planta diminuiu em função da proximidade entre elas;
- O espaçamento e a densidade na área plantada apresentou maior influência no coeficiente adimensional de redução da velocidade  $R(x,z)$  do que o valor máximo de  $C_i$  utilizado;

*Sobre a influência do perfil vertical de  $C_i$  ( $LAD * C_D$ )*

- A introdução da estratificação vertical para descrição do coeficiente de resistência inercial ( $C_i$ ) a partir da utilização de expoente  $N$ , melhorou a representação do efeito da resistência imposta pelos elementos da vegetação ao escoamento do ar, o que proporcionou resultados mais precisos no comportamento do escoamento dentro e na vizinhança da barreira;
- O perfil vertical do coeficiente adimensional de redução da de  $R(x,z)$  apresentou melhor ajuste aos dados experimentais com o detalhamento de  $C_i$  com a altura, pois a redução foi superestimada quando a distribuição vertical de  $C_i$  não é considerada ( $N=0$ );
- A utilização do  $C_i$  uniforme causou a superestimação da redução da velocidade dentro da barreira, fornecendo resultados muito discrepantes, porém, apresentou maior ajuste aos resultados na esteira próxima. À medida que a distância longitudinal ( $x$ ) aumentou na esteira da barreira, a influência da resistência das árvores reduz e o modelo retomou a velocidade, resultando na diminuição da superestimação e ajustando-se melhor ao experimental;
- A variação do parâmetro  $H_{máx}$  alterou significativamente os resultados para o coeficiente adimensional de redução da velocidade e afetou a formação da região de esteira a jusante da barreira. Assim, a correta estimativa (para cada tipo de árvore) desse parâmetro melhora a capacidade de predição do comportamento dos campos de velocidade e contribui no aumento da precisão dos resultados observados na área de abrigo a ser protegida pela barreira de vento;
- Essa alteração modifica a distribuição das características da resistência imposta pelas estruturas internas da vegetação, dessa forma a correta estimativa de tal parâmetro melhora a capacidade de predição do comportamento dos campos de velocidade e turbulência avaliados, contribuindo assim na maior precisão dos resultados observados nas regiões de interesse, área de abrigo a ser protegida pela barreira de vento;
- As características morfológicas da barreira vegetal modificaram o comportamento do escoamento dentro e na vizinhança da vegetação, alteraram a formação da

região de abrigo a jusante e influenciaram a velocidade de fricção na zona de esteira próxima e afastada;

- Estes resultados mostraram a importância da utilização do perfil vertical de  $C_i$  para melhorar representação da distribuição da força de resistência gerada pelas plantas no escoamento, porém, é importante considerar as dificuldades apresentadas pelos modelos na predição do escoamento na esteira da barreira, visto que a descrição de  $C_i$  com altura resultou na subestimação do escoamento na esteira, local de interesse no estudo de erosão eólica.

### Escoamento em barreira artificial

#### *Sobre a escolha do modelo de turbulência*

- O modelo de turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST mostrou maior sensibilidade que o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável às alterações da malha, como o tamanho do elemento próximo à superfície sólida, comportamento este esperado dado os critérios de modelagem.
- Os modelos de turbulência apresentaram diferenças (aproximadamente 15%) nos valores de velocidade de fricção calculados, mantendo a mesma tendência do comportamento para todos os casos avaliados;
- Os modelos não conseguiram prever com precisão a velocidade em  $x=0$  na região acima da barreira para a porosidade  $\beta = 0,2$ ;
- O modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST, que apresentou maior precisão nos resultados de velocidade para todos os pontos obtidos, além de prever com acurácia o escoamento nas camadas superiores para a porosidade de  $\beta = 0,4$ ;
- O modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST mostrou a maior concordância com os dados experimentais, especialmente, para porosidade maiores, como 0,4 e 0,6;

#### *Sobre a escolha das relações empíricas para o cálculo do coeficiente de resistência*

- As relações empíricas não revelaram impacto significativo nos resultados dos perfis de velocidade medidos, porém mostraram variações nos resultados calculados de energia cinética turbulenta e vorticidade;

- As equações de Song et al. (2014) e Xu Calay e Mustafa (2019) forneceram os melhores ajustes no cálculo da velocidade próximo da barreira, enquanto a equação de Yeh; Tsai; Yang (2010) obteve melhor concordância com os dados para regiões da esteira afastada;
- A influência das relações foi menor em valores maiores da coordenada longitudinal a jusante da barreira;
- A variação do coeficiente de resistência  $C_i$  influenciou os resultados do campo de TKE na esteira próximo e afastada da barreira, sendo que a equação de Yeh; Tsai; Yang (2010) apresentou os menores valores de TKE em toda área de influência da barreira;
- As relações empíricas utilizadas para calcular o coeficiente de resistência inicial ( $C_i$ ) influenciou nos resultados da distribuição da velocidade de fricção. Observou-se a diferença de 13%, 29% e 25% na velocidade de fricção calculada na esteira da barreira entre  $0 < x/H < 15$  para  $\beta = 0,2; 0,4$  e  $0,6$ , respectivamente, a partir das três diferentes equações usadas para calcular o coeficiente de resistência  $C_i$ .

#### *Sobre a influência da porosidade da barreira*

- O aumento da porosidade de 0,2 para 0,4 resultou no incremento da região com velocidade de fricção reduzida, na diminuição da recirculação formada a jusante e na redução velocidade de fricção na zona de esteira próxima;
- A porosidade influenciou na redução da velocidade de fricção, o aumento da porosidade levou a redução menor da velocidade de fricção na região de proteção a jusante da barreira. Essa redução foi em média de 32% menor quando a porosidade aumentou para  $\beta=0,6$ ;
- O aumento da porosidade influenciou na localização do ponto da velocidade de fricção mínima, que foi deslocado da região próxima na esteira da barreira ( $x=3H$ ) para as porosidades de 0,2 e 0,4 para esteira afastada em  $x=10H$  na porosidade de 0,6;

- O aumento na porosidade resultou em uma região com boa redução da velocidade e melhor proteção, pois não houve a formação de recirculação o que poderia aumentar a turbulência e causa a elevação da velocidade de fricção.

## 6.2 PERSPECTIVAS

Os resultados apresentados ao longo do trabalho deixaram claro a importância de se desenvolver de forma adequada as simulações numéricas de escoamentos turbulentos sob efeito de barreiras de vento modeladas como meios porosos. Diversos fatores com relevância na influência do escoamento nas validações apresentadas foram testados para ambas as barreiras vegetal e artificial. Entretanto, ainda é necessário:

- Realizar análises estatísticas das comparações entre os resultados da simulação numérica e dos experimentos em túnel de vento. O objetivo das análises estatísticas é fornecer avaliações quantitativas da comparação dos perfis advindos dos campos de velocidade e turbulência prevendo a otimização do procedimento de análise dos parâmetros morfológicos das árvores em barreiras vegetais e das equações empíricas que estimam o coeficiente de resistência inercial para os diferentes valores de porosidade para as barreiras artificiais;
- Investigar de forma simultânea a modelagem do escoamento modificado pelas barreiras e seus efeitos sobre fontes difusas de material particulado, pilhas de estocagem e vias sujeitas a ressuspensão devido ao escoamento atmosférico nos pátios;
- Realizar experimento em escala reduzida de túnel de vento em barreira vegetais para avaliação das diferentes componentes da velocidade e calcular as propriedades turbulentas do escoamento como a produção e dissipação da energia cinética turbulenta em uma barreira vegetal, considerando diferentes densidades;
- Realizar experimentos em túnel de vento e medições de campo mais determinação da densidade de área foliar (LAD) e do coeficiente de resistência inercial para cada planta;
- Avaliar numericamente o escoamento em barreira naturais modelado a partir dos dados morfológicos da vegetação implementados utilizando a descrição do perfil vertical do coeficiente de resistência ( $C_i$ ) considerando as condições atmosféricas de camada limite, de forma que o domínio seja suficiente grande para que não

haja a influências das paredes do domínio no escoamento medido na barreira de vento e na região de esteira dessa.

- Implementar termo fonte para as equações de transporte da energia cinética turbulenta, taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e dissipação específica da energia cinética turbulenta. Este tipo de consideração poderia tornar mais acurada a modelagem do escoamento dentro barreira e na região de esteira;
- Avaliar o uso de modelos de turbulência que não sejam baseados nas médias de Reynolds (LES, por exemplo) na estimativa dos fluxos turbulentos e, por consequência, no cálculo da velocidade de fricção sobre as superfícies de interesse. Vale ressaltar que o uso destes modelos ficaria, em um primeiro momento, restrito na avaliação local em escala reduzida do efeito atenuador da velocidade causada por estas barreiras;
- Investigar diferentes formatos de barreiras artificiais. Os trabalhos experimentais de túnel de vento de Dong et al. (2007, 2010) utilizados no presente trabalho para validação dos resultados das simulações numéricas do escoamento em barreiras artificiais somente contemplaram barreiras na forma de colunas verticais sólidas paralelas.

## REFERÊNCIAS

- ABHIJITH, K. V. et al. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. **Atmospheric Environment**, v. 162, p. 71–86, 2017.
- ANSYS, I. ANSYS Fluent Theory Guide. v. 15317, n. November, p. 724–746, 2013.
- ARGYROPOULOS, C. D.; MARKATOS, N. C. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 2, p. 693–732, 2015.
- BADR, T.; HARION, J. L. Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 2, p. 360–368, 2007.
- BADR, T.; HARION, J. L. Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 30, p. 5576–5584, 2005.
- BASNET, K.; CONSTANTINESCU, G. Effect of a bottom gap on the mean flow and turbulence structure past vertical solid and porous plates situated in the vicinity of a horizontal channel bed. **Physical Review Fluids**, v. 4, n. 4, p. 44604, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.044604>>.
- \_\_\_\_\_. The structure of turbulent flow around vertical plates containing holes and attached to a channel bed. **Physics of Fluids**, v. 29, n. 11, 2017.
- BEAN, A.; ALPERI, R. W.; FEDERER, C. A. **A METHOD FOR CATEGORIZING SHELTERBELT POROSITY**. *Agricultural Meteorology*. [S.l: s.n.], 1975.
- BITOG, J. P. et al. A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag. **Forest Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 8–16, 2011.
- BITOG, J. P. et al. Numerical simulation study of a tree windbreak. **Biosystems Engineering**, v. 111, n. 1, p. 40–48, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.006>>.
- BORGES, A. R.; VIEGAS, D. X. Shelter effect on a row of coal piles to prevent wind erosion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 29, n. 1–3, p. 145–154, 1988.
- BRUNO, L.; HORVAT, M.; RAFFAELE, L. Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 177, n. April, p. 340–365, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.021>>.
- BUCCOLIERI, R. et al. Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 31, n. February, p. 212–220, 2018.
- CARLOS, J.; LOPES, P. Atmospheric Flow over Forested and Non-Forested Complex Terrain Jos é Carlos Pereira Lopes da Costa MSc in Mechanical Engineering. n. July 2008, 2007.
- CHEN, G. et al. 3D numerical simulation of wind flow behind a new porous fence. **Powder Technology**, v. 230, p. 118–126, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.017>>.

CONG, X. C. et al. Field measurements of shelter efficacy for installed wind fences in the open coal yard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 117, p. 18–24, 2013.

\_\_\_\_\_. Impact of the installation scenario of porous fences on wind-blown particle emission in open coal yards. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 30, p. 5247–5253, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.005>>.

CORNELIS, W. M.; GABRIELS, D. Optimal windbreak design for wind-erosion control. **Journal of Arid Environments**, v. 61, n. 2, p. 315–332, 2005.

DESMOND, C. J.; WATSON, S. J.; HANCOCK, P. E. Modelling the wind energy resources in complex terrain and atmospheres. Numerical simulation and wind tunnel investigation of non-neutral forest canopy flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 166, p. 48–60, 2017.

DESMOND, C. J. et al. A study on the inclusion of forest canopy morphology data in numerical simulations for the purpose of wind resource assessment. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 126, p. 24–37, Mar. 2014.

DONG, Z. et al. A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, n. 1–2, p. 82–93, 2007.

DONG, Z. et al. A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 2, p. 193–207, Fev. 2010.

DUPONT, S.; BERGAMETTI, G.; SIMOËNS, S. Journal of Geophysical Research: Earth Surface Modeling aeolian erosion in presence of vegetation. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 119, p. 1–20, 2014.

EFTHIMIOU, G. C. et al. CFD-RANS prediction of the dispersion of a hazardous airborne material released during a real accident in an industrial environment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 46, p. 23–36, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.015>>.

GROMKE, C. et al. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. **Building and Environment**, v. 83, p. 11–26, 2015.

GUO, L.; MAGHIRANG, R. G. Numerical simulation of airflow and particle. v. 6, n. 1, p. 110–122, 2012.

HONG, S. W.; LEE, I. B.; SEO, I. H. Modelling and predicting wind velocity patterns for windbreak fence design. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 142, p. 53–64, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.007>>.

JEANJEAN, A. et al. Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 22, p. 41–53, 2017.

JONCKHEERE, I. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1–2, p. 19–35, 2004.

KATUL, G. G. et al. One- and two-equation models for canopy turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 113, n. 1, p. 81–109, 2004.

KIM, R. et al. Design of a windbreak fence to reduce fugitive dust in open areas. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 149, n. November, p. 150–165, 2018.

LALIC, B.; MIHAILOVIC, D. T. An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, n. 4, p. 641–645, 2004.

LATEB, M. et al. Comparison of various types of  $\kappa$ - models for pollutant emissions around a two-building configuration. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, p. 9–21, 2013.

LAUNDER, B. E.; SHARMA, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in heat and mass transfer**, v. 1, n. 2, p. 131–137, 1974.

LEE, S.-J.; KIM, H.-B. **Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence.** **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. [S.l: s.n.], 1998.

LEE, S.-J.; LIM, H.-C. **A numerical study on now around a triangular prism located behind a porous fence.** **Fluid Dynamics Research**. [S.l: s.n.], 2001.

LEE, S.-J.; PARK, C.-W. **Surface-pressure variations on a triangular prism by porous fences in a simulated atmospheric boundary layer.** . [S.l: s.n.], 1998.

LEE, S. J.; KIM, H. B. Laboratory measurements of velocity and turbulence field behind porous fences. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 80, n. 3, p. 311–326, 1999.

LEE, S. J.; PARK, C. W. The shelter effect of porous wind fences on coal piles in POSCO open storage yard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 84, n. 1, p. 101–118, 2000.

LEE, S. J.; PARK, K. C.; PARK, C. W. Wind tunnel observations about the shelter effect of porous fences on the sand particle movements. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 9, p. 1453–1463, 2002.

LI, B.; SHERMAN, D. J. **Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review.** **Aeolian Research**. [S.l.]: Elsevier. , 1 Jun. 2015

LIU, B. et al. Numerical evaluation of the scale problem on the wind flow of a windbreak. **Scientific Reports**, v. 4, p. 20–22, 2014.

LIU, C. et al. Airflow around single and multiple plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 252, n. June 2017, p. 27–38, 2018.

LYU, J.; WANG, C. M.; MASON, M. S. Review of models for predicting wind characteristics behind windbreaks. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 199, n. March, p. 104117, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104117>>.

MANICKATHAN, L. et al. Comparative study of flow field and drag coefficient of model and small natural trees in a wind tunnel. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 35, p. 230–239, 1 Oct. 2018.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.

MIRI, A.; DRAGOVICH, D.; DONG, Z. The response of live plants to airflow – Implication for reducing erosion. **Aeolian Research**, v. 33, p. 93–105, 1 Ago. 2018.

\_\_\_\_\_. Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2017a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-13084-x>>.

MOCHIDA, A. et al. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10–11, p. 1667–1677, 2008.

MORADPOUR, M.; AFSHIN, H.; FARHANIEH, B. A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree planting. **Atmospheric Pollution Research**, v. 8, n. 2, p. 253–266, 2017.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM and Matlab**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 113.

MUSTAFA, M. et al. Measurement of Wind Flow Behavior at the Leeward Side of Porous Fences Using Ultrasonic Anemometer Device. **Energy Procedia**, v. 85, n. January, p. 350–357, 2016.

NOVAK, L. et al. Numerical modeling of dust lifting from a complex-geometry industrial stockpile. **Strojnikski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, v. 61, n. 11, p. 621–631, 2015.

PARK, C. W.; LEE, S. J. Verification of the shelter effect of a windbreak on coal piles in the POSCO open storage yards at the Kwang-Yang works. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 13, p. 2171–2185, 2002.

ROSENFELD, M.; MAROM, G.; BITAN, A. Numerical simulation of the airflow across trees in a windbreak. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 135, n. 1, p. 89–107, 2010.

SALIM, M. H.; SCHLÜNZEN, K. H.; GRAWE, D. Journal of Wind Engineering Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas : Should we care ? v. 144, p. 84–95, 2015.

SAN, B.; WANG, Y.; QIU, Y. Numerical simulation and optimization study of the wind flow through a porous fence. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 18, n. 5, p. 1057–1075, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10652-018-9580-1>>.

SAN, B.; ZHAO, Y.; QIU, Y. Numerical simulation and optimization study of surface pressure and flow field around a triangular prism behind a porous fence. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 19, n. 4, p. 969–987, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10652-019-09695-9>>.

SANTIAGO, J. L. et al. Evaluation of a CFD-based approach to estimate pollutant distribution within a real urban canopy by means of passive samplers. **Science of the Total Environment**, v. 576, p. 46–58, 2017.

\_\_\_\_\_. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. **Atmospheric**

**Environment**, v. 41, n. 30, p. 6406–6420, 2007.

SHIH, T.-H. et al. A new  $\kappa$ - eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. **Computers & Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227–238, 1995.

SOGACHEV, A. A note on two-equation closure modelling of canopy flow. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 130, n. 3, p. 423–435, 2009.

SONG, C. F. et al. Numerical simulation of airflow structure and dust emissions behind porous fences used to shelter open storage piles. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 14, n. 6, p. 1584–1592, 2014.

STUNDER, B. J. B.; ARYA, S. P. S. Windbreak effectiveness for storage pile fugitive dust control: A wind tunnel study. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 38, n. 2, p. 135–143, 1988.

TIWARY, A.; MORVAN, H. P.; COLLS, J. J. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. **Journal of Aerosol Science**, v. 37, n. 8, p. 990–1015, 2006.

TOMINAGA, Y. et al. Comparison of various revised  $k$ - models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1: 1: 2 shape placed within the surface boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 4, p. 389–411, 2008.

TOMINAGA, Y.; STATHOPOULOS, T. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: model evaluation of RANS and LES. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2231–2239, 2010.

\_\_\_\_\_. Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment. **Building and Environment**, v. 105, p. 390–402, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.027>>.

VERSTEEG, H. K. .; MALALASEKERA, W. . **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. [S.l.: s.n.], 2007. v. M.

WANG, H.; TAKLE, E. S.; SHEN, J. Shelterbelts and windbreaks: mathematical modeling and computer simulations of turbulent flows. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 33, n. 1, p. 549–586, 2001. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.fluid.33.1.549>>.

XU, Y.; CALAY, R. K.; MUSTAFA, M. Y. Feasibility of Computational Fluid Dynamics for Analyzing Airflow Around Porous Fences. **Heat Transfer Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1546663>>.

YAKHOT, V.; ORSZAG, S. A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. **Journal of scientific computing**, v. 1, n. 1, p. 3–51, 1986.

YEH, C. P.; TSAI, C. H.; YANG, R. J. An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 98, n. 10–11, p. 520–532, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.04.002>>.

ZENG, F. et al. CFD simulation of the drag effect of urban trees: Source term modification method revisited at the tree scale. **Sustainable Cities and Society**, v. 56, n. February, 2020.



## APÊNDICE I – TESTE DE SENSIBILIDADE DA MALHA

A discretização do domínio computacional é uma etapa importante nos estudos em CFD, pois o nível de refinamento e qualidade da malha podem interferir nos resultados da simulação numérica (TU; YEOH; LIU, 2018). Além disso, a capacidade de reprodução da influência da geometria está diretamente ligada ao refinamento da malha. Assim, a escolha da malha é das etapas fundamentais para a obtenção de bons resultados nas simulações dos casos estudados.

Desta forma, para a simulação das barreiras de vento, foi utilizado a ferramenta de geração de malha contida no pacote ANSYS 19.1. O teste de sensibilidade da malha foi realizado para identificar a configuração mais adequada considerando a precisão dos resultados e a viabilidade computacional.

Esta etapa foi dividida em duas partes. A primeira parte é apresentado o teste de sensibilidade da malha da simulação do experimento da barreira vegetal. Enquanto que na segunda parte, é apresentado teste de sensibilidade da malha da simulação para o estudo de barreiras de vento artificiais (*windfence*).

### **1º Parte: sensibilidade da malha no estudo do escoamento em barreira vegetal**

#### *Teste de sensibilidade da malha*

Quatro malhas foram construídas e avaliadas nesta etapa. As malhas geradas seguiram critérios semelhantes no particionamento das regiões do domínio (geometria geral e superfície). O tamanho dos elementos no domínio variou entre as malhas nos elementos tetraédricos, considerando as proporções de 50% entre os Grid 1 e Grid 2, e 25% entre os Grid 2, Grid 3 e Grid 4.

Próximo à superfície foram gerados elementos prismáticos. Os elementos são gerados por linhas retas paralelas à superfície e interceptam a malha com elementos tetraédricos (Figura 58).

Esta estratégia de refinamento possibilita que os elementos mais próximos às fronteiras físicas, onde são observados os maiores gradientes, tenham faces perpendiculares ou paralelas à direção principal do escoamento.

Os casos foram simulados utilizando condições de entrada semelhantes, considerando o regime permanente e condições de contorno referentes às apresentadas na seção 4.2.3.1. Para representar a vegetação, as seguintes características morfológicas foram utilizadas:  $LAD_{m\acute{a}x}$  de  $0,5m^2/m^3$ ,  $N=4$  e  $H_{m\acute{a}x}=85\%$ .

Além da sensibilidade da malha, a influência dos modelos de turbulência na predição do escoamento também foi avaliada. Assim, para o caso simulado no teste de malha, foram utilizados os seguintes modelos de turbulência:  $k - \epsilon$  *Renormalization Group Theory* (RNG),  $k - \epsilon$  *Realizable* e  $k - \omega$  *Shear Stress Transport*.

Importante resalta que as malhas foram construídas de forma semelhantes para ambos os modelos, diferenciando apenas no critério de cada modelo em relação ao tratamento na parede e a distância da parede sugerida para cada modelo, ou seja, respeitando o  $y^+$  (distância da parede ao primeiro elemento da malha) necessário de cada modelo. Para isso, o  $y^+$  referente ao modelo de fechamento da turbulência  $k - \omega$  SST foi de  $y^+ = 5$  e a partir da condução da malha para o modelo, distância do primeiro elemento para o modelo  $k - \epsilon$  foi então calculado. Assim, foi possível garantir a semelhança entre as malhas quanto a espessura das camadas prismáticas, conforme pode ser visto na Figura 58.

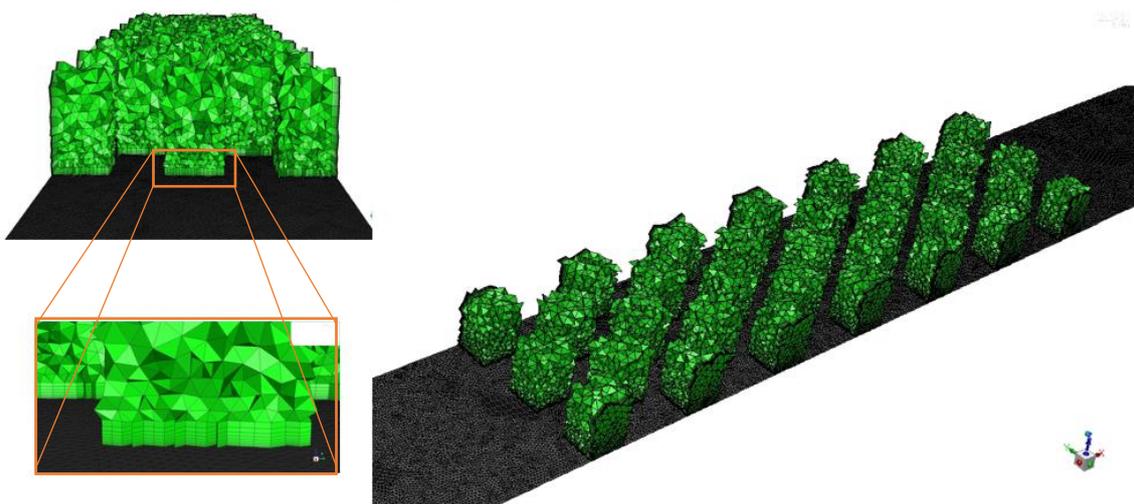
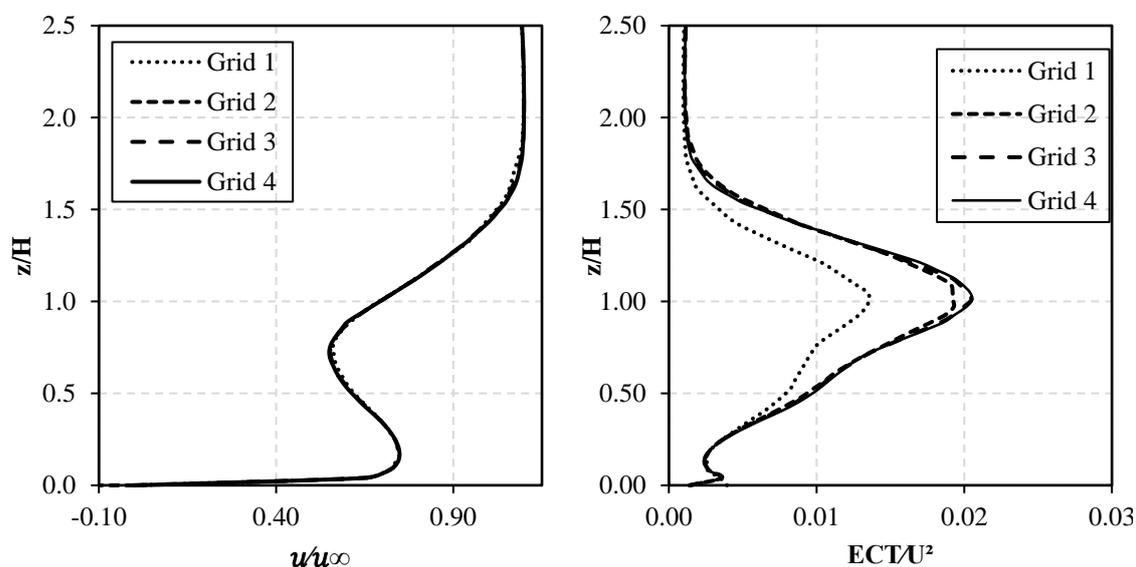


Figura 58: Detalhe da barreira vegetal no domínio computacional. Vista frontal da vegetação e destaque dos elementos prismáticos da região próximo a superfície sólida.

Tabela 6: Descrição das malhas computacionais avaliadas no teste de sensibilidade

| Malha  | Total elementos<br>(modelo $\kappa$ - $\epsilon$ ) | Total de elementos<br>( $\kappa$ - $\omega$ SST) |
|--------|--|--|
| Grid 1 | 1,6 milhões  | 2,1 milhões                                      |
| Grid 2 | 3,6 milhões  | 4,3 milhões                                      |
| Grid 3 | 5,4 milhões  | 6,5 milhões                                      |
| Grid 4 | 8,8 milhões  | 10,5 milhões                                     |

A Figura 59 apresenta os resultados dos perfis de velocidade e energia cinética turbulenta simulados para uma velocidade na corrente livre de 12m/s com diferentes malhas e modelos de turbulência. No teste de sensibilidade da malha foram avaliados os perfis de velocidade média na direção x e a energia cinética turbulenta do escoamento. As variáveis foram medidas até a altura de  $z = 2,5H$  em  $x/H = 0,8$  do início da barreira vegetal. O teste de malha avaliou a capacidade de predição do escoamento de cada malha para obter a independência dos resultados em relação ao refinamento do grid computacional.



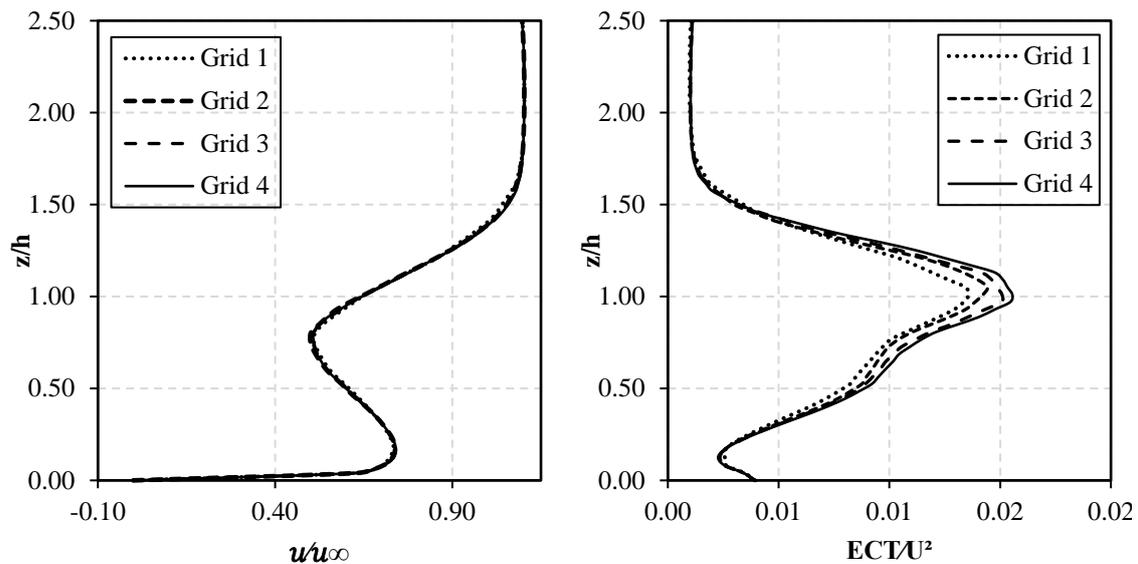


Figura 59: Perfis de velocidade e energia cinética turbulenta calculados a partir de diferentes malhas. (a) e (b) são apresentados os resultados simulados usando o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$  RNG, (c) e (d) o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST

Não houve modificação significativa dos resultados dos perfis de velocidade quando a malha em estudo foi refinada para ambos os modelos testados. As diferenças medidas entre os Grid 3 e Grid 4 não foram significativas, configurando assim, um nível de refinamento satisfatório avaliação dos casos estudados. No entanto, os perfis de energia cinética turbulenta forneceram importantes diferenças, as quais foram determinantes na obtenção da independência da malha e na escolha dessa.

No gráfico de ECT observa-se maior diferença na região  $0,3 < z/H < 1,25$ , intervalo próximo a topo do dossel da vegetação onde são encontrados os maiores valores do coeficiente de resistência inercial expressos pelo LAD na equação x para este caso. A diferença neste ponto é importante de ser analisada, uma vez que é a esta constituída na principal região de interesse do estudo, o dossel da vegetação. Assim, a malha que apresenta a independência dos resultados da simulação será usada escolhida no estudo dos demais casos investigados no presente trabalho.

Considerando a independência dos resultados da malha e o custo computacional de simulação a elas associado, o Grid 3 forneceu melhores resultados, sendo portanto, a malha escolhida para ser utilizada na investigação dos demais casos avaliados no estudo.

**2º Parte: teste de sensibilidade para experimentos em escala reduzida para barreira artificial (*windfence*).**

### *Teste de sensibilidade da malha*

Foram geradas oito malhas diferentes e simuladas para escolha da malha utilizada nos casos posteriores. A construção delas foi realizada de forma semelhante, diferenciando apenas no tamanho do elemento global e no refinamento da malha (Figura 60). Próximo a superfície do túnel de vento e da barreira, elementos prismáticos foram gerados respeitando os critérios dos modelos avaliados ( $y^+$ ) de forma que a espessura total das camadas seja igual em ambos os modelos ( $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e  $\kappa$ - $\omega$  SST). Na região adjacente a camada de prismas, o tamanho do elemento foi o mesmo para todas as malhas avaliadas no teste de sensibilidade. Na Tabela 7 é apresentada as algumas características das malhas testadas, como o número total de elemento e o tamanho da célula global.

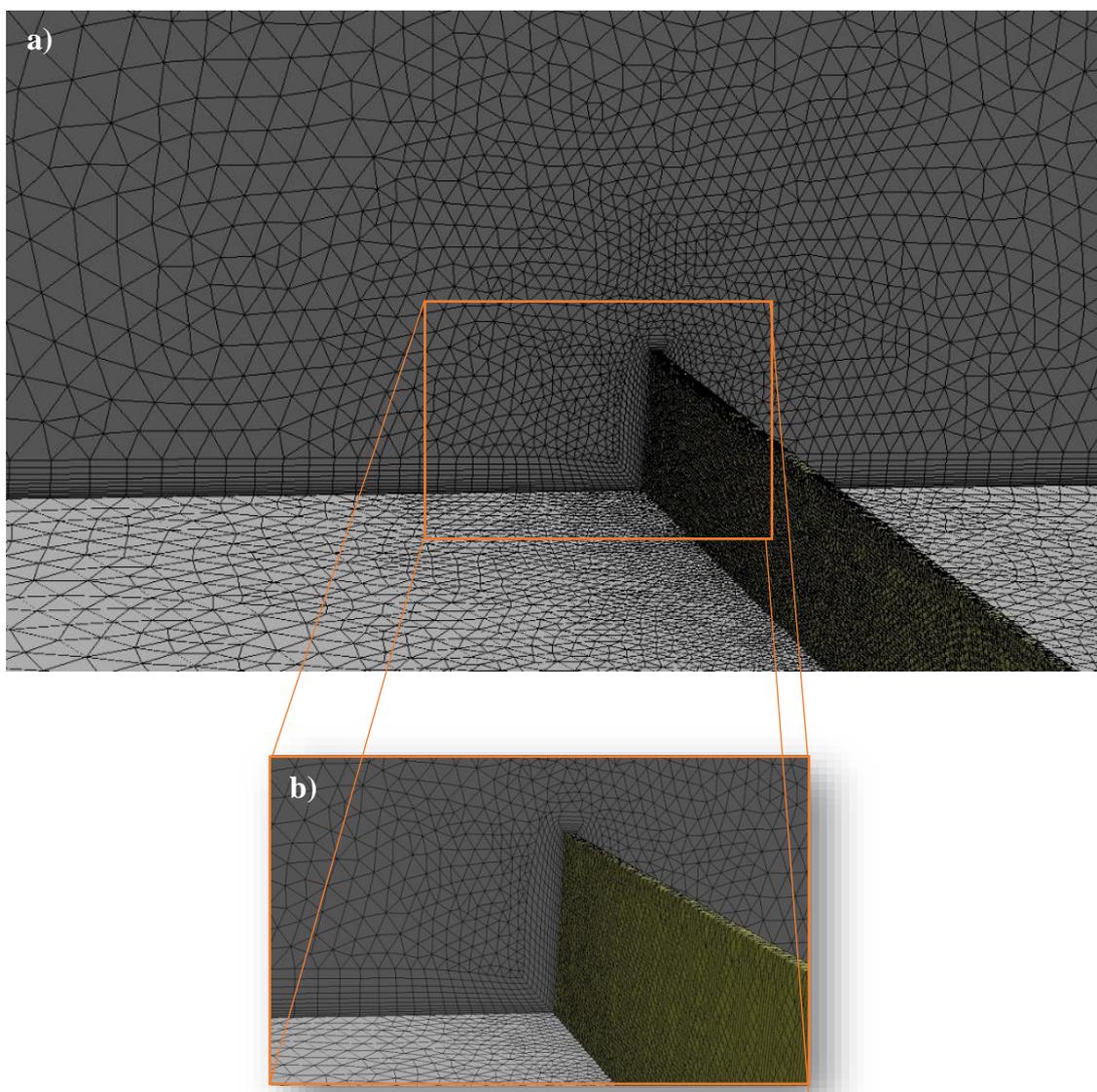


Figura 60: Detalhe da barreira porosa artificial no domínio computacional. Vista perpendicular da barreira e destaque dos elementos prismáticos da região próximo a superfície sólida.

Tabela 7: Descrição das malhas computacionais avaliadas no teste de sensibilidade da barreira porosa artificial

| Malha  | Total elementos (modelo $\kappa$ - $\epsilon$ ) | Total de elementos ( $\kappa$ - $\omega$ SST) | Tamanho do elemento global (m) |
|--------|---|---|--------------------------------|
| Grid 1 | 3.7 milhões                                     | 4.07 milhões                                  | $1.1 \times 10^{-2}$           |
| Grid 2 | 3.8 milhões                                     | 4.2 milhões                                   | $8.0 \times 10^{-2}$           |
| Grid 3 | 3.9 milhões                                     | 4.4 milhões                                   | $7.0 \times 10^{-2}$           |
| Grid 4 | 4.7 milhões                                     | 5.2 milhões                                   | $4.5 \times 10^{-2}$           |
| Grid 5 | 5.4 milhões                                     | 5.9 milhões                                   | $3.75 \times 10^{-2}$          |
| Grid 6 | 6.5 milhões                                     | 7.2 milhões                                   | $3.0 \times 10^{-2}$           |
| Grid 7 | 7.9 milhões                                     | 8.8 milhões                                   | $2.5 \times 10^{-2}$           |
| Grid 8 | 10 milhões                                      | 11 milhões                                    | $2.0 \times 10^{-2}$           |

As simulações foram realizadas considerando as seguintes condições de contorno: regime permanente, escoamento incompressível, um perfil logaritmo de camada limite na entrada, gradiente normal nulo na saída, solo e a barreira sólida parede fixa sem deslizamento. Laterais e topo simetria, e barreira porosa, meio poroso.

Um perfil logaritmo de velocidade na entrada de 10 m/s e condições de turbulência (intensidade da turbulência) semelhantes aos dados experimentais em túnel de vento (Figura 61), os quais foram medidos em uma região a montante e fora da influência da barreira de vento.

Semelhante as simulações do teste de malha, foram avaliadas as predições do campo de escoamento para os seguintes modelos de turbulência foram avaliados:  $k - \epsilon$  *Renormalization Group Theory*,  $k - \epsilon$  *Realizable* e  $k - \omega$  *Shear Stress Transport*.

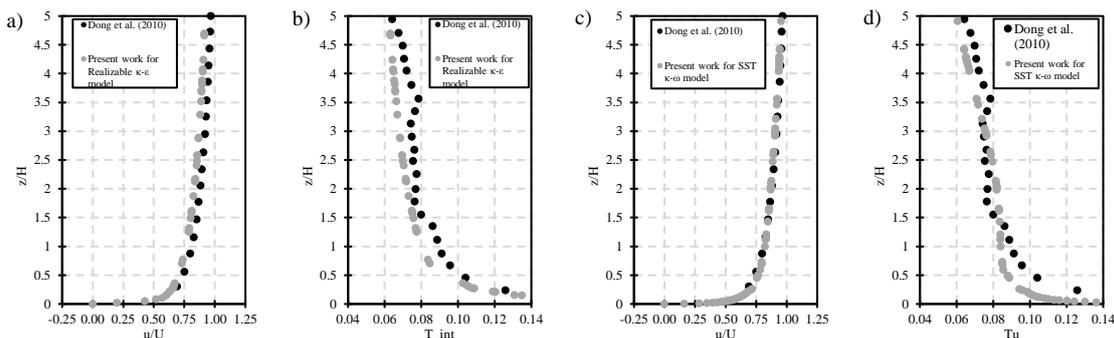


Figura 61: Comparação dos perfis de entrada de velocidade e intensidade de turbulência em função da altura entre o experimental de Dong et. al (2010) e as simulações numéricas. (a) Velocidade e (b) Intensidade de turbulência obtidos pelo modelo de turbulência modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável; (c) Velocidade e (d) Intensidade de turbulência calculados com o modelo de turbulência o modelo  $\kappa$ - $\omega$  SST

Na análise do teste de sensibilidade da malha computacional foram utilizados os dados das seguintes variáveis: (I) perfil vertical da velocidade média longitudinal, (II) perfil vertical da velocidade média vertical e (III) perfil vertical da energia cinética turbulenta. Foram obtidos perfis dentro da região de esteira próxima e afasta barreira de vento em cinco posições, “ $x/H=0$ ”; “ $x/H=0,5$ ”; “ $x/H=3$ ”; “ $x/H=10$ ” e “ $x/H=25$ ” (ver Figura 62 - Figura 67), com a finalidade de observar o comportamento de cada malha no estudo. Os resultados das diferentes malhas testadas foram obtidos e comparadas com os dados do estudo em túnel de vento realizado por Dong et al. (2010).

A capacidade de predição do escoamento em diferentes modelos de turbulência para as malhas avaliadas também foi investigada. Malhas semelhantes foram simuladas com diferentes modelos de fechamento da turbulência, os quais foram: (I)  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizável e (II)  $\kappa$ - $\omega$  SST), a fim de avaliar a sensibilidade dos resultados ao tratamento da turbulência realizado pelo modelos, bem como a influência do tamanho do grid no resultado final das variáveis analisadas ao longo do domínio.

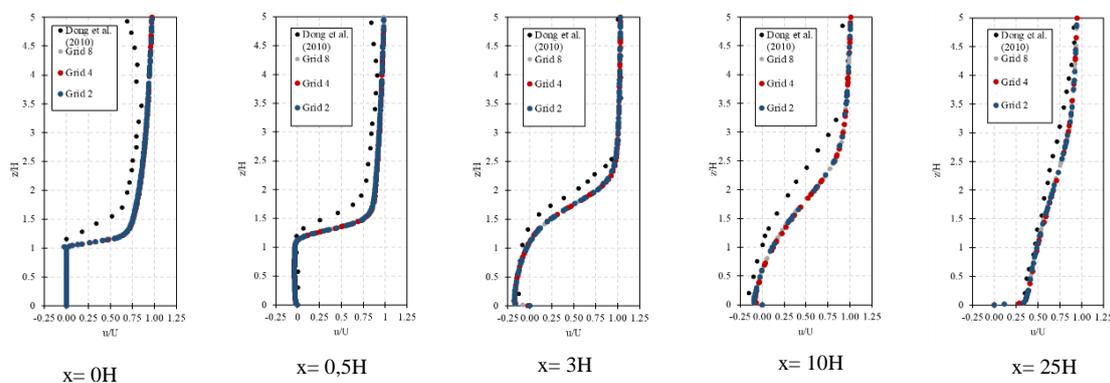


Figura 62: Comparação dos perfis verticais da componente longitudinal de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável.

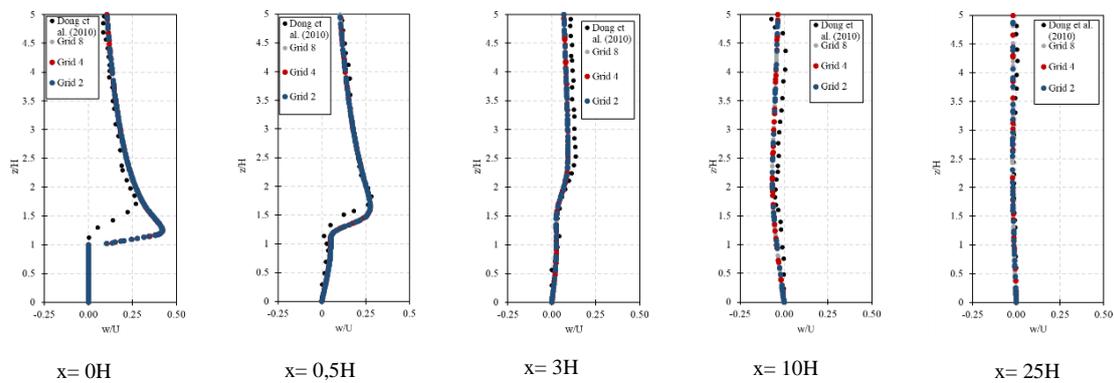


Figura 63: Comparação dos perfis verticais da componente vertical de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável.

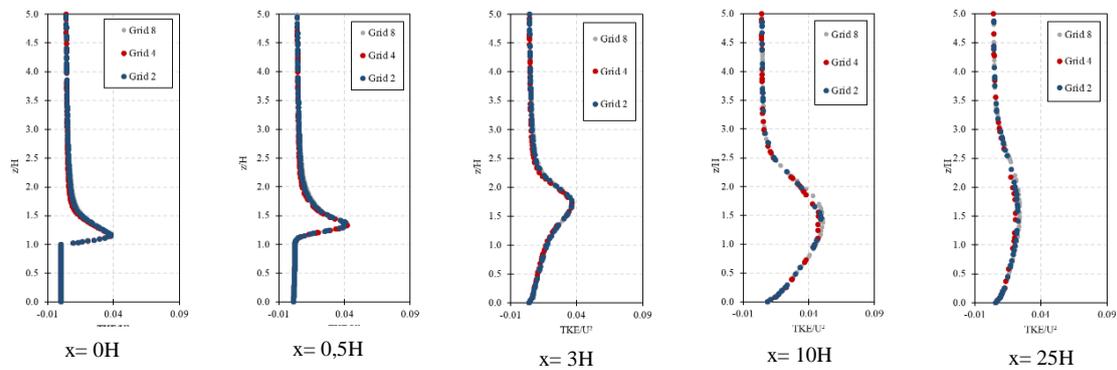


Figura 64: Comparação dos perfis de energia cinética turbulenta para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  Realizável.

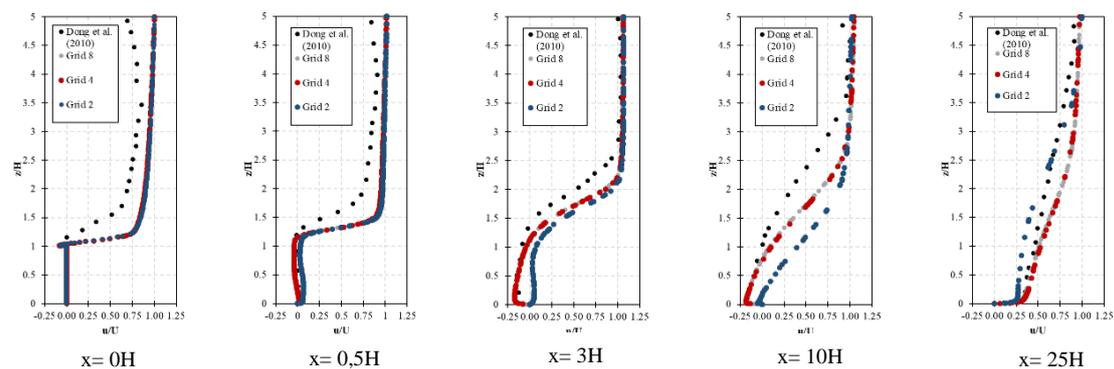


Figura 65: Comparação dos perfis verticais da componente longitudinal para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de modelagem da turbulência  $\kappa$ - $\omega$  SST

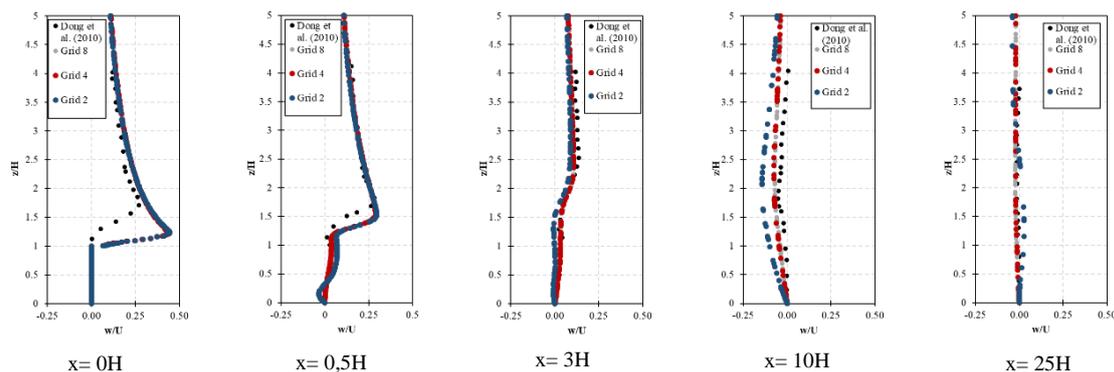


Figura 66: Comparação dos perfis verticais da componente vertical de velocidade para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de turbulência  $\kappa\text{-}\omega$  SST

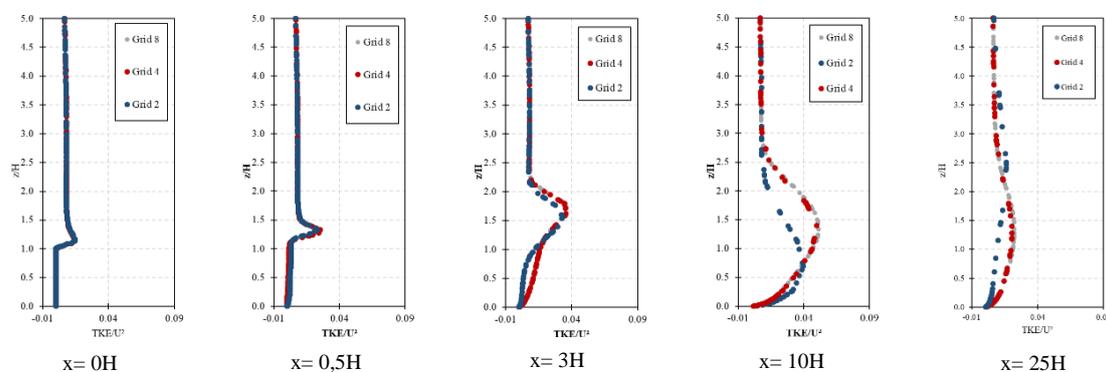


Figura 67: Comparação dos perfis de energia cinética turbulenta para diferentes malhas em relação ao dados experimentais de túnel de vento de Dong et. al (2010), para resultados simulados usando o modelo de modelagem da turbulência  $\kappa\text{-}\omega$  SST.

Inicialmente o teste de sensibilidade da malha foi realizado para diferentes valores de porosidades, os quais foram: 0% (sólido); 20% e 80%. Estes valores foram escolhidos de acordo com os estudos encontrados na literatura os quais apresentam significativas diferenças na formação do escoamento desenvolvido. Não houve modificações importantes nos resultados dos perfis obtidos para barreira de vento com porosidade de 20% e 80% nas malhas avaliadas. Os resultados não apresentaram diferenças em relação aos modelos quando a malha foi refinada.

A barreira sólida, diferentemente das barreiras porosas mostrou importantes variações nos perfis obtidos com malhas diferentes. No entanto, este resultado foi verificado apenas nas simulações utilizando o modelo  $\kappa\text{-}\omega$  SST (ver Figura 65 - Figura 67). Enquanto que os resultados dos perfis obtidos com o modelo  $\kappa\text{-}\epsilon$  Realizável não apresentaram relevantes modificações com o maior refinamento do domínio computacional (ver nas Figura 64 e Figura 65).

Os resultados dos perfis obtidos com o modelo de turbulência  $\kappa\text{-}\omega$  SST apresentaram maior distinção entre as malhas testadas na esteira turbulenta longo atrás da barreira de vento, na posição de  $x/H = 0,5$ . A variação da diferença entre as malhas foi mais expressiva com a distância a jusante da barreira. Conforme pode ser visto, os perfis de velocidade média vertical, energia cinética turbulenta e velocidade vertical foram significativamente diferentes para as posições  $x/H = 3$ ,  $x/H = 10$  e  $x/H = 25$  em  $z/H < 1,5$ .

A escolha da malha foi em função de alcançar um nível de refinamento suficiente na região da esteira turbulenta da barreira porosa a fim de obter maior detalhamento do comportamento do escoamento ao redor da barreira, especialmente a jusante dessa na região de esteira turbulenta a altura inferior a  $z/H = 1$ , visto ser essa a região de maior interesse no estudo. Assim, o Grid 4 foi escolhido para simulação dos demais casos investigados no presente trabalho dado sua boa capacidade de detalhamento do comportamento do escoamento e ao ganho computacional entre elas ter sido significativo em relação ao Grid 8.