



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

APLICAÇÕES DE MODELOS RANS NAS PREDIÇÕES DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM ÁREAS URBANAS COM DIFERENTES GEOMETRIAS DE TELHADO

Pamella G. Paganoto^{*1}, Reginaldo R. C. de Paula¹, Fernanda C. Cezana², Marcos S. P. Gomes³

^{*1} Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil
correo-e: pampaganoto@hotmail.com

² Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil

³ Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

O objetivo deste trabalho é investigar numericamente os efeitos de diferentes geometrias de telhados no escoamento atmosférico de áreas urbanas. Simulações numéricas tridimensionais do escoamento do vento em uma área urbana foram realizadas com o uso do modelo de turbulência κ - ϵ padrão e (ANSYS CFX 14.5). Modelos RANS geralmente são mais utilizados nas simulações do escoamento em áreas urbanas [1]. Neste contexto, o modelo mais utilizado é o κ - ϵ padrão apesar de suas deficiências nas simulações do escoamento com gradientes de pressão adversos intensos e nas superpredições da energia cinética turbulenta nas extremidades dos telhados de edifícios [2]. Neste estudo considerou-se uma área urbana idealizada com seis modelos de edifícios em escala reduzida dispostos simetricamente, com espaçamento igual a 0,06 m entre eles. Além disso, foram estudadas quatro morfologias de regiões urbanas com distribuição homogênea de obstáculos com as seguintes formas de telhado: (1) plano; (2) duas águas; (3) uma água a montante e (4) uma água a jusante e com o mesmo espaçamento entre elas. Os resultados numéricos do campo médio foram comparados com dados do campo instantâneo provenientes de experimentos de túnel de vento. O número de Reynolds do escoamento foi $Re = 3,9 \times 10^3$, na qual considerou-se a velocidade medida na altura do prédio como velocidade de escala característica e uma altura característica $H = 0,06$ m. Os resultados mostraram que o modelo de turbulência κ - ϵ padrão conseguiu reproduzir algumas das estruturas observadas em experimentos de túnel de vento, tais como as os vórtices frontais no primeiro prédio da área urbana. Porém, entre os obstáculos ele não captura as estruturas vorticosas observadas em experimentos de túnel de vento. As predições com o modelo de turbulência κ - ϵ RNG apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

Palavras Chaves: Modelagem da turbulência, regiões urbanas, estruturas vorticosas



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

Os estudos do escoamento atmosférico no ambiente urbano é importante devido às várias aplicações práticas nas áreas de engenharias mecânica, ambiental e civil e meteorologia. A crescente urbanização que vem ocorrendo nas cidades tem gerado mudanças no clima local, tais como a transformação de energia associada com a sua morfologia, propriedades térmicas dos materiais e geração antropogênica de calor [3].

Do ponto de vista da aerodinâmica do escoamento turbulento em áreas urbanas, o aumento de áreas construídas e a ocupação desordenada do solo geram alterações no microclima urbano, tais como mudança da velocidade e direção dos ventos, e redução do sistema de ventilação natural pelo aumento da rugosidade superficial [4]. Além disso, as construções urbanas tem grande influência no transporte e dispersão de gases e partículas tóxicos provenientes de emissões veiculares ou acidentais, o que tem causado alterações na qualidade do ar e danos à saúde humana [5; 6]

A estrutura da circulação do ar no ambiente urbano é caracterizada por um padrão complexo devido a superposição e interação do escoamento nas proximidades de prédios adjacentes. Isto causa deflexões nas linhas de corrente, separação do escoamento e modificações na circulação local, bem como a formação de zonas de recirculação, diferentes estruturas vorticosas e pontos de recolamento [7; 8].

Vários parâmetros meteorológicos tais como a velocidade e direção do vento, estabilidade da atmosférica e temperatura e geométricos, tais como formato do telhado, altura das construções, design arquitetônico, e dimensões da rua afetam o campo de vento turbulento do ambiente urbano [1]. Além disso, a geometria do telhado tem um efeito significativo no padrão do escoamento em áreas urbanas [9]. Em anos recentes vários autores têm investigado as influências do formato do telhado no campo de vento nas proximidades de prédios isolados e em conjuntos de prédios [10].

A modelagem numérica é uma ferramenta muito útil para avaliar os efeitos da geometria do telhado no padrão do escoamento de ambientes urbanos. O modelo $\kappa - \varepsilon$ é o modelo de turbulência mais utilizado nas simulações numéricas do escoamento em áreas urbanas [11; 12]. Embora apresente deficiências na previsão de escoamentos no quais as tensões normais sejam relevantes (escoamentos com forte curvatura de linhas de corrente e zonas de recirculação) [13].

[14] realizaram simulações numéricas com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão para investigaram os efeitos do layout da rua no escoamento e dispersão de poluentes em uma área urbana formada por prédios com telhado duas águas.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

[1] investigou numericamente as influências de prédios com telhados planos, duas água, uma água a montante e uma água a jusante no escoamento e dispersão de poluentes em uma área urbana. Foram realizadas simulações bidimensionais de trezes áreas urbanas idealizadas formadas por oito prédios com diferentes geometrias e alturas de telhado com vento externo incidindo perpendicularmente. Os resultados das predições numéricas foram comparados com dados de experimentos de túnel de vento e apresentaram boa concordância.

O objetivo principal deste trabalho foi investigar os efeitos de diferentes geometrias de telhado (uma água a montante, uma água a jusante, duas águas e telhado plano), no campo de escoamento tridimensional nas proximidades de um conjunto de prédios de um ambiente urbano idealizado. Foram realizadas simulações numéricas com o pacote comercial ANSYS CFX 14.5 e uso do modelo κ - ε padrão. Predições numéricas do perfil vertical da velocidade média do vento foram comparados com medições realizadas em um túnel de vento de camada limite atmosférica.

2. MATERIAIS E METODOS

2.1 Experimentos de Túnel de Vento

As simulações físicas do escoamento em condições de estabilidade neutra nas proximidades de seis obstáculos com diferentes geometrias de telhados foram realizadas em um túnel de vento de camada limite atmosférica. Este é um túnel de retorno aberto com seções de teste de $2,0 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$, localizado no Laboratório de Energia do IFES, Campus Vitória.

Foram realizadas medições do perfil vertical de velocidade média do vento na entrada da seção de teste do túnel de vento e no telhado dos prédios com um tubo de Pitot de sonda 3 mm acoplado a um manômetro digital (TSI EBT720). A Figura 1 mostra uma representação esquemática dos pontos de medição da velocidade do vento na seção testes do túnel de vento, X_0 e X_1 .

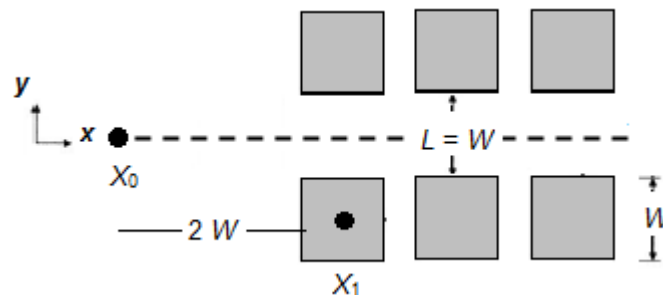


Figura 1 – Pontos de medição da velocidade do vento.



Nos experimentos foram utilizados quatro diferentes morfologias de conjuntos de prédio com seis prédios de acrílico cada e as seguintes geometrias de telhado: duas águas, uma água a montante, uma água a jusante e planos, com o vento externo incidindo perpendicularmente a face frontal o primeiro obstáculo. A Figura 2, apresenta as dimensões dos obstáculos utilizados no experimento.

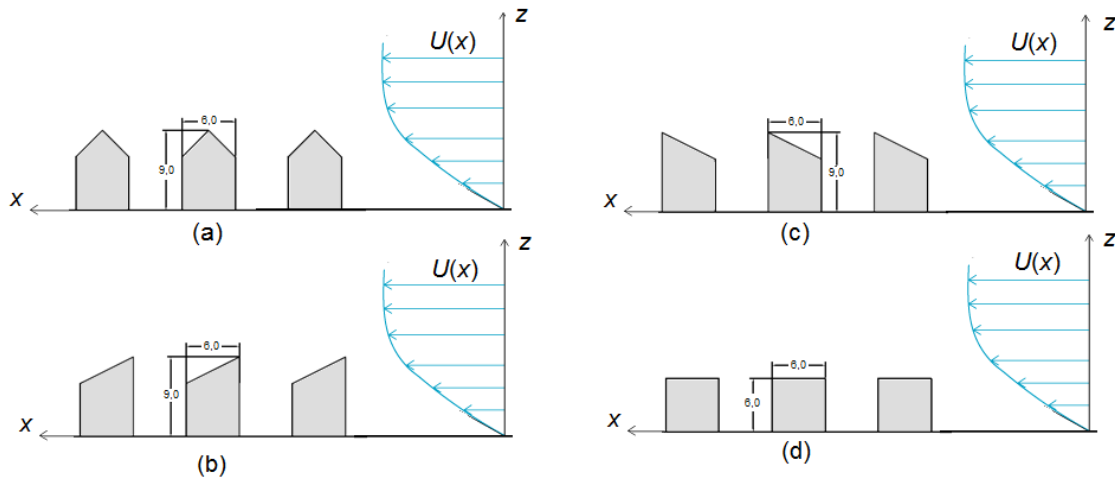


Figura 2 – Representação esquemática dos diferentes conjuntos de obstáculos com telhados do tipo: (a) duas águas; (b) uma água a montante; (c) uma água a jusante e (d) plano. As dimensões estão em cm.

2.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações governantes utilizadas neste trabalho para solucionar o campo de escoamento tridimensional (3-D) foram às equações da continuidade (Equação 1) e da quantidade de movimento (Equação 2). Considerou-se um escoamento em regime permanente incompressível de um fluido newtoniano com viscosidade constante.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[- \left(\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2\mu}{3\rho} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} + \frac{\mu_{ef}}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, u'_i e \bar{u}_i são as velocidades turbulentas e médias na direção x_i ($i = 1, 2, 3$), μ_{eff} é a viscosidade efetiva, \bar{p} é a flutuação de pressão, $\overline{u'_i u'_j}$ são os tensores de Reynolds, que representam os fluxos de quantidade de movimento.

2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Na modelagem numérica do escoamento 3-D nas proximidades de um conjunto de prédios foi utilizado o pacote comercial ANSYS CFX 14.5, com o uso do modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão. A Tabela 1 apresenta as condições de contorno aplicadas no domínio computacional.

Tabela 1 – Condições de contorno da entrada.

Contorno	Condição de Contorno
Entrada	$u(z) = u_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^p$ $k_{ent} = \frac{3}{2} I^2 U^2$ $\varepsilon_{ent} = \rho C_\mu \left(\frac{\kappa^2}{\mu_t} \right)$
Saída	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Laterais e topo	Parede livre de deslizamento
Superfícies dos prédios e base do plano xy ($z = 0$)	Parede com condição de não deslizamento

onde, $u(z)$ representa a velocidade média, u_o é a velocidade de entrada obtida experimentalmente, z é a altura medida, z_o é a altura de referência medida na corrente livre, κ_{ent} é a energia cinética turbulenta de entrada, $I = 0,037$ é a intensidade da turbulência, ε_{ent} é a dissipação da energia cinética turbulenta; $C_\mu = 0,09$ é uma constante, p é a pressão e μ_t é a viscosidade turbulenta.

3. RESULTADOS

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas 3-D com o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão do campo escoamento ao redor de seis prédios com diferentes geometrias de telhado com o vento externo perpendicular a face frontal do primeiro obstáculo ($\theta = 90^\circ$).

A Figura 3 apresenta os resultados das simulações numéricas para o conjunto de obstáculos com telhados do tipo duas águas. Na Figura 3(a) no plano $x-z$, foi observada entre os prédios a formação de uma grande recirculação ($0,06 \leq z \leq 0,09$ m). Para alturas $z \leq 0,06$ m parte do escoamento moveu-se em direção à parede frontal do prédio a jusante e retornando em direção ao prédio a montante. Na Figura 3(b) no plano $x-y$, entre o primeiro e o segundo prédios foi observada uma única estrutura vorticosa e entre o segundo e terceiro prédios os resultados mostram a formação de duas regiões de recirculação, com vorticidade em sentidos contrários.

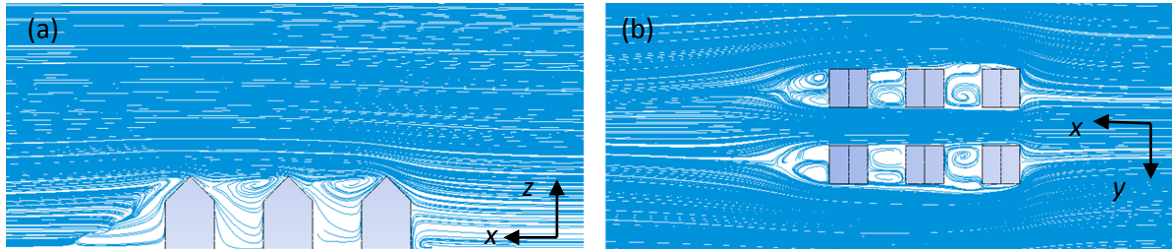


Figura 3 Visualización das simulações numéricas com obstáculos de telhados duas águas: (a) plano x-z e (b) plano x-y.

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações numéricas para o conjunto de obstáculos com telhados do tipo uma água a montante. No plano x-z foi observada uma pequena recirculação acima do telhado do segundo prédio. Além disso, o escoamento acima do telhado move em direção ao prédio a jusante e na sua face frontal tem um movimento descendente e próximo ao solo retorna na direção do prédio a montante, conforme mostra a Figura 4(a). No plano x-y entre o primeiro e segundo prédios tem-se a formação de uma grande vorticidade com sentido de rotação do prédio a jusante para o prédio a montante, Figura 4(b). Entretanto, entre o segundo e terceiro prédios ocorreu uma redução do comprimento de escala desta recirculação, ocorrendo somente na esteira do prédio a montante, Figura 4(b). da escala de comprimento desta recirculação.

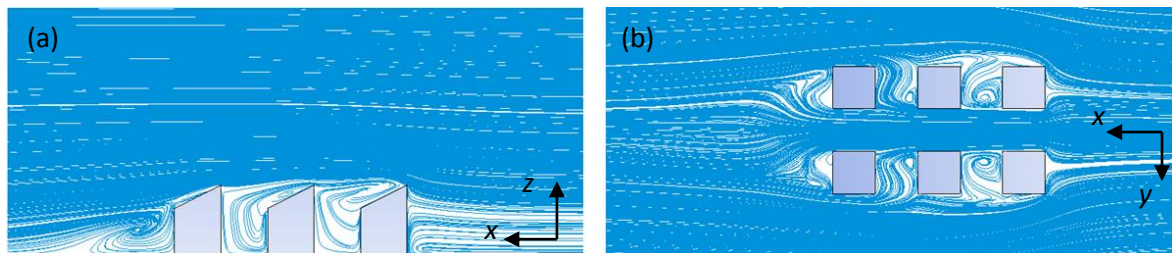


Figura 4 Visualização das simulações numéricas com obstáculos de telhados uma água a montante: (a) plano x-z e (b) plano x-y.

A Figura 5 mostra as linhas de corrente das simulações numéricas para o conjunto de obstáculos com telhados do tipo uma água a jusante. Os resultados da Figura 5(a) no plano x-z mostraram que para $0,06 \leq z \leq 0,09$ m, o escoamento moveu-se do telhado do prédio a jusante em direção à face de trás do obstáculo a montante, no qual recirculou e dirigiu-se a jusante. Para $z \leq 0,06$ m o escoamento moveu-se da região incidente do prédio a jusante para a esteira do prédio a montante, Figura 5(a). No plano x-y, entre os prédios o escoamento apresentou um comportamento anti-simétrico em relação a plano central, na qual tem se a formação de uma única recirculação na região de esteira de um prédio e do lado oposto a formação de duas zonas de recirculação, Figura 5(b).

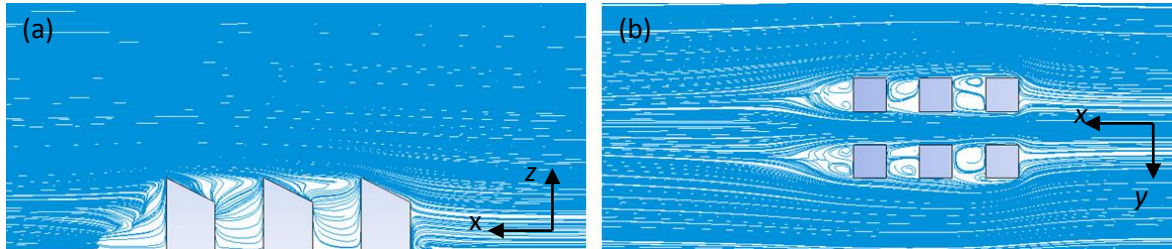


Figura 5 Visualización das simulações numéricas com obstáculos de telhados uma água a jusante: (a) plano x-z e (b) plano x-y.

A Figura 6 mostra as linhas de corrente das simulações numéricas para o conjunto de obstáculos com telhados planos. Os resultados da Figura 6(a), no plano x-z, mostraram a formação de uma grande região de recirculação entre os prédios. Além disso, o escoamento abaixo do nível do telhado ($z < 0,06$ m) foi desacoplado do escoamento acima. Este comportamento foi característico de um escoamento *skimming flow*, conforme estudos realizados por [15]. Porém, o modelo não simulou a separação do escoamento e a recirculação característica que ocorre em telhados planos. No plano x-y, entre os prédios o escoamento também apresentou um comportamento anti-simétrico em relação a plano central, conforme os resultados apresentados na Figura 5(b).

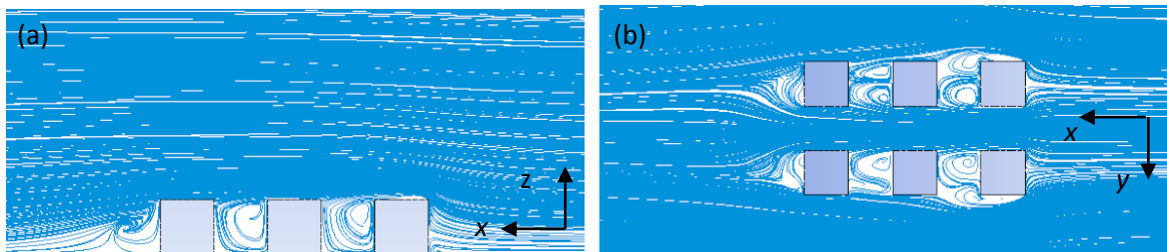


Figura 6 Visualização das simulações numéricas com obstáculos de telhados planos: (a) plano x-z e (b) plano x-y.

Para validar as simulações numéricas foram realizadas medições do perfil de velocidade vertical da velocidade do vento. Os experimentos foram executados em túnel de vento de camada limite atmosférica. A Figura 7 apresenta os resultados das medições experimentais e numéricas realizadas na seção de entrada do túnel de vento e domínio computacional 3-D e no telhado do primeiro obstáculo do tipo duas águas, uma água a montante e uma água a jusante. Os resultados das Figuras 7(a) e 7(b) mostram que as predições numéricas da velocidade vertical com o modelo de turbulência $\kappa \epsilon$ padrão apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais. Para o caso do obstáculo de telhado uma água a montante, os resultados foram satisfatório somente entre $0,09 \text{ m} \leq z \leq 0,22 \text{ m}$, veja Figura 7(c). Porém, no caso do telhado uma água a jusante os resultados numéricos não apresentaram boa concordância com os valores experimentais.



IV CAIM 2014

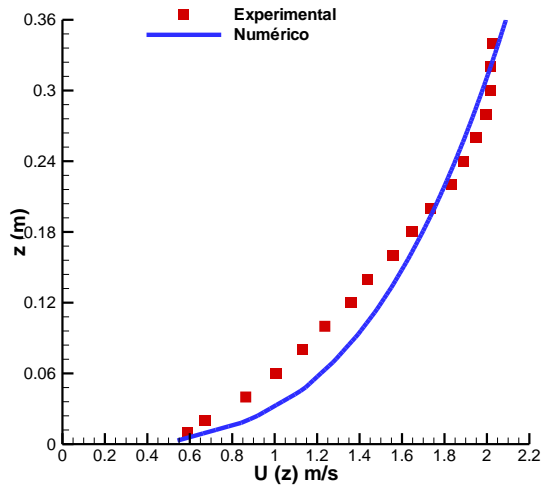
Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



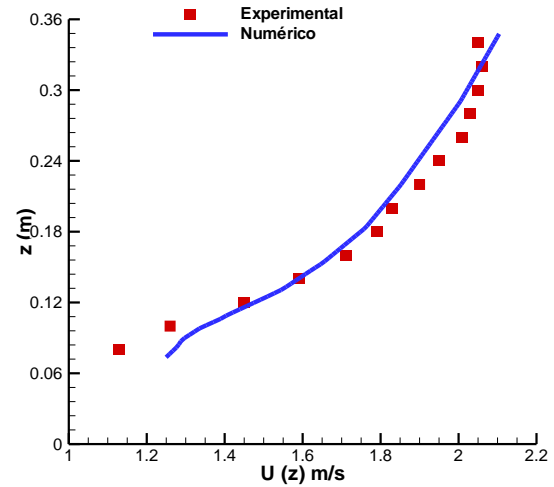
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

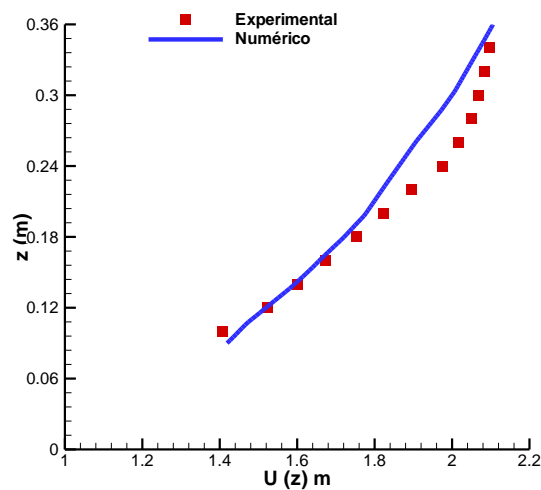
FoDAMI



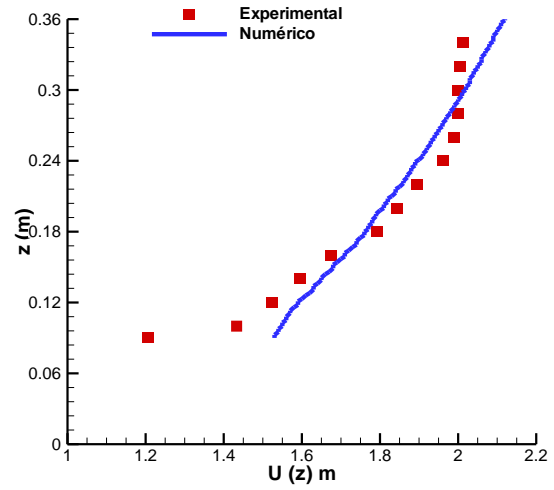
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7 – Perfis verticais da velocidade média do vento: (a) entrada da seção de testes e domínio computacional; (b) centro do telhado duas águas; (c) centro do telhado uma água a montante e (d) centro do telhado uma água a jusante.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas como o modelo de turbulência $\kappa \epsilon$ padrão para investigar o comportamento do campo de vento nas proximidades de obstáculos com diferentes geometrias de telhados. O modelo conseguiu capturar algumas características do escoamento ao redor de corpos rombudos e no dentro e acima de dosséis urbanos, tais como os vórtices *standing* na face frontal do primeiro obstáculo e regiões de recirculação no interior do dossel urbano, plano $x-y$. Os resultados sugerem que a geometria do telhado influenciou de forma significativa o padrão do escoamento nas diferentes morfologias de conjunto de prédios investigados. Com o vento incidindo paralelamente ao eixo central foi observado um efeito de canalização do escoamento. A comparação dos perfis verticais da velocidade média do vento obtidos das simulações numéricas apresentou boa concordância com dados experimentais, exceto no caso da geometria de telhado uma água a jusante, sendo necessário então investigar quais os ajustes necessários nas condições de contorno ou refinamento da malha. Além disso, o modelo não capturou a recirculação característica que ocorre na superfície superior de obstáculos com telhados planos.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Yassin, M.F., Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons, Atmospheric Environment, **Vol.** 45, pp, 5220-5229, 2011.
- [2] Chan, A.T., Au, W.T.W., So, E.S.P., Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality – Par II: Multiple canopies and canyons, Atmospheric Environment, **Vol.** 37, pp. 2761- 2772, 2003.
- [3] Assis, E.S.. Abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In. Encontro Nacional e IV Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 8, 2005, Maceió, Alagoas, Brasil, Anais, ANTAC, pp., 92-101, 2005.
- [4] Ayoade, J.O. Introdução à climatologia para os trópicos. 8º Edição, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2002.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- [5] Kim, J-J, Baik, J-J., A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG κ - ϵ turbulence model, Atmospheric Environment , **Vol.** 38 (2004) 3039–3048, 2004.
- [6] Gromke, C., Ruck, B., Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field, Atmospheric Environment, **Vol.** 41 (2007) 3287–3302.
- [7] Chang, C-H e Meroney, R.N., Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **Vol.** 89, pp. 1325–1334, 2001.
- [8] Simoëns, S., Ayrault, M., Wallace, J.M., The flow across a street canyon of variable width—Part 1: Kinematic description, Atmospheric Environment, **Vol.** 41 (2007) 9002–9017.
- [9] Louka P., Belcher S. E., Harrison R.G. Modified street canyon flow. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **Vol.** 74, pp. 485-493, 1998.
- [10] Rafailidis, S., Schatzmann, M., Concentration Measurements with Different Roof Patterns in Street Canyon with Aspect Ratios $B/H = 1/2$ and $B/H =$ Universität Hamburg, Meteorologisches Institute, 1995.
- [11] Assimakopoulos, V.D., Apsimon, H.M., Moussiopoulos, N., 2003. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations. Atmospheric Environment, **Vol.** 37, 4037e4049.
- [12] Xie, X., Huang, Z., Wang, J., 2005. Impact of building configuration on air quality in street canyon, Atmospheric Environment, **Vol.** 39, 4519e4530, 2005.
- [13] Junior, A.C.P. Elementos Finitos Aplicados à Turbulência, Turbulência, Turbulência: Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência, Rio de Janeiro, 1995.
- [14] Huang, Y., Jin, M., Sun, Y., Numerical studies on airflow and pollutant dispersion in urban street canyons formed by slanted roof buildings. Journal of Hydrodynamics, **Vol.** 9 (1), pp. 100-106, 2007.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

[15] Oke TR. Street design and urban canopy layer climate. Energy Buildings, **Vol.** 11, pp. 103-113, 1988.

Agradecimientos

Os autores agradecem o suporte financeiro do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES.