



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

MODELAGEM DA TURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM ÁREAS URBANAS NÃO HOMOGÊNEAS

Carolina L. Guimarães*¹, Raquel Alves Viana¹, Artur Burgo¹, Reginaldo R.R. de Paula¹ e
Fernanda C. Cezana¹

*¹ Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil
correo-e: carolinalimaguimaraes@gmail.com

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi investigar as influências de edifícios de diferentes dimensões no escoamento turbulento em uma área urbana. Neste estudo foi considerada uma zona urbana idealizada com distribuição não homogênea dos edifícios. O estudo deste mecanismo é crucial no entendimento de como as dimensões dos obstáculos afetam o sistema de ventilação natural do meio ambiente urbano e conseqüentemente a dispersão de poluentes [1]. No presente trabalho foram realizadas simulações numéricas com o programa da dinâmica dos fluidos computacional ANSYS CFX 14.5, na qual foram utilizados os modelos de turbulência $\kappa - \epsilon$ padrão e tensor de Reynolds ω . Para validar os resultados numéricos do escoamento na zona urbana foram realizados experimentos de túnel de vento de camada limite atmosférica. Nas simulações físicas foram utilizadas as técnicas de injeção direta de fumaça e plano de laser (luz de laser verde, 500 mW-532 nm). Para um vento incidente perpendicular à rua foram identificadas diferentes estruturas de vórtices, tais como os vórtices frontais, *shedding* e ferraduras. Além disso, a separação da camada limite e regiões de intensa recirculação do escoamento também foram capturadas nas predições numéricas e experimentais. Apesar das diferenças nos resultados das predições numéricas dos dois modelos de turbulência utilizados foi observado que os obstáculos altos causaram mudanças significativas no campo de vento, gerando um efeito de abrigo na sua esteira.

Palavras-chaves: Áreas urbanas, modelagem da turbulência, escoamento atmosférico, túnel de vento.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



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

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização, o comportamento do campo de vento nas cidades tem mudado em relação ao seu padrão natural, uma vez que prédios, casas e outros obstáculos interferem na passagem do ar [2]. Isto tem contribuído para transformações significativas no microclima local, tais como redução do seu sistema de ventilação natural e formação de ilhas de calor. Dentre os possíveis efeitos dessas mudanças estão o aumento da concentração de poluentes atmosféricos e o aumento indesejado da temperatura em determinados locais [3,4].

Em anos recentes, várias áreas das engenharias têm focado sua atenção nas questões ambientais, na conservação da energia e desenvolvimento sustentável de forma a mitigar os altos índices de poluição atmosférica e elevada demanda de energia em sistemas de refrigeração [4]. Isto é decorrente da necessidade de se buscar uma melhoria da qualidade do ar e da saúde da população que vive e trabalha em grandes centros urbanos.

O escoamento do ar em dosséis urbanos é caracterizado por altos números de Reynolds, (i.e. escoamento turbulento de alta intensidade), uma geometria complexa (topografia do terreno, morfologia dos edifícios e ruas) que causam mudanças no microclima local [5,6]. Os dosséis urbanos são geralmente definidos pela razão de aspecto, $RA = W/H$, onde W é a largura da rua e H é a altura dos obstáculos. RA é um indicador das influências dos edifícios no campo de vento e na formação das estruturas vorticosas no interior do dossel urbano [6].

Os estudos das influências dos obstáculos no escoamento atmosférico em áreas urbanas são cruciais para um planejamento urbano mais eficiente e que se possa reduzir os impactos negativos do processo de urbanização. Um grande esforço tem sido realizado para compreender o campo de vento nos dosséis urbanos, através de pesquisas em túnel de vento e simulação numérica [7]. Apesar do complexo padrão do escoamento em dosséis urbanos, significativo progresso tem sido obtido para um melhor entendimento deste mecanismo.

Entretanto, várias questões ainda precisam ser investigadas, por exemplo, as influências de obstáculos de diferentes alturas. Isso decorre do fato de que a maioria dos estudos recentes do escoamento em regiões urbanas tem investigado o seu comportamento em dosséis urbanos formados por prédios homogêneos [6,8]. Entretanto, em muitas regiões urbanas a presença de prédios altos e ruas estreitas causam uma obstrução no escoamento do vento externo, resultando, por exemplo, em altos índices da concentração de poluentes [9].

O objetivo principal deste trabalho foi investigar as influências de prédios altos no padrão do escoamento em diferentes dosséis urbanos. Para alcançar este objetivo foram realizadas simulações físicas em túnel de vento para obter-se o campo instantâneo e os modelos de turbulência κ - ϵ padrão e tensor de Reynolds- ω , para se obter o campo médio.



2. MATERIAIS E METODOS

2.1 Experimentos no Túnel de Vento

Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de camada limite atmosférica com seção de testes de 2,0 m × 0,5 m × 0,5 m, localizado no Laboratório de Engenharia do IFES, em Vitória, Brasil. Foi simulado um escoamento em condições neutras de estabilidade atmosférica. Para a análise qualitativa do padrão do escoamento, foram utilizadas as técnicas de injeção de fumaça e plano de luz de laser verde (500 mW, 532 nm). Maiores detalhes do procedimento experimental encontra-se em [10].

Dois tipos diferentes de prédios de acrílico foram utilizados com as seguintes dimensões: prédios cúbicos de altura H e prédios com base quadrada de lado L e altura $2H$, tal que $H = 0,08$ m. Em todos os experimentos considerou-se o vento externo incidindo perpendicularmente à rua para as razões de aspecto $W/H = 1,0$ e $2,0$, conforme mostra a vista superior da Figura 1.

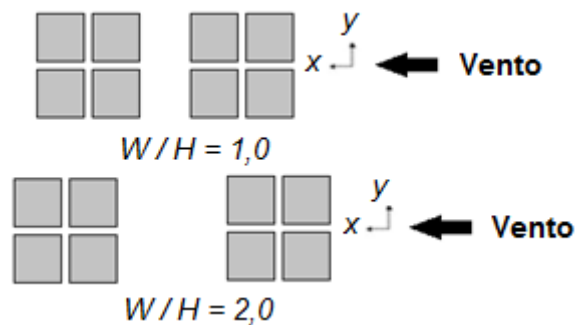


Figura 1 Vista superior das configurações urbanas, plano x-y. O menor espaçamento entre os prédios foi de 0,02 m.

2.2 Equações Governantes

Nas simulações numéricas considerou-se um escoamento em regime permanente de um fluido incompressível com viscosidade constante. Utilizou-se o pacote comercial ANSYS CFX 14.5 nas soluções das equações da continuidade e conservação de quantidade de movimento que governam o escoamento, com base na abordagem de Navier-Stokes Média de Reynolds (RANS, por *Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

2.3 Métodos Numéricos

O pacote comercial da dinâmica dos fluidos computacional ANSYS CFX 14.5 foi utilizado para calcular o perfil de escoamento tridimensional, 3-D, dentro e acima do dossel urbano. Os cálculos foram executados com o uso dos modelos de turbulência κ - ϵ padrão (KEP) e tensor de Reynolds ω (TRW). As dimensões do domínio computacional 3-D considerado neste trabalho foram $20H \times 10H \times 10H$, onde H é a altura do prédio cúbico, $H = 0,10$ m. Foram realizados procedimentos de validação e testes de convergência de malhas com o programa CFX Mesh.A



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

Tabela 1 apresenta as condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas com os modelos $\kappa - \varepsilon$ padrão e tensor de Reynolds- ω .

Tabela 1 Condições de contorno.

Modelo de Turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão		Modelo de Turbulência tensor de Reynolds ω	
Contorno	Condição de Contorno	Contorno	Condição de Contorno
Entrada	$u = u_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^p$ $k_{ent} = \frac{3}{2} I^2 U^2$ $\varepsilon_{ent} = \rho C_{\mu} \left(\frac{\kappa^2}{\mu_t} \right)$	Entrada	$u = u_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^p$ $\overline{u' u'} = \overline{v' v'} = \overline{w' w'} = \frac{1}{3} \kappa$ $\overline{u' v'} = \overline{u' w'} = \overline{v' w'} = 0$ $\omega = \frac{\kappa}{\nu(\mu_t / \mu)}$
Laterais e topo	Parede livre de deslizamento	Laterais e topo	Parede livre de deslizamento
Superfícies dos prédios e base do plano xy ($z=0$)	Parede com condição de não deslizamento	Superfícies dos prédios e base do plano xy ($z=0$)	Parede com condição de não deslizamento
Saída	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	Saída	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

3. RESULTADOS

3.1 Primeira Configuração Urbana – $WH = 1,0$.

A Figura 2 mostra os resultados da visualização experimental do campo instantâneo do escoamento na região incidente e no telhado do primeiro prédio, no plano x-z. Vórtices *standing* foram observados na região frontal do prédio cúbico abaixo do ponto de estagnação, Figura 2(a), e na região acima dele, devido à presença do prédio mais alto a jusante dele, Figura (2b). A Figura 3 mostra o escoamento no interior da rua a jusante do prédio mais alto, no plano x-z. Nesta região foi possível observar a formação de vórtices *shedding* no nível do telhado e estruturas vorticosas abaixo com diferentes escalas de comprimento, características de uma região de esteira com alta intensidade da turbulência.

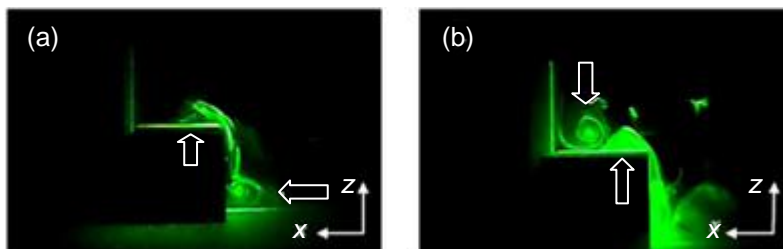


Figura 2 Visualização experimental do campo instantâneo do escoamento no plano x-z na região incidente dos prédios na primeira configuração urbana.



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

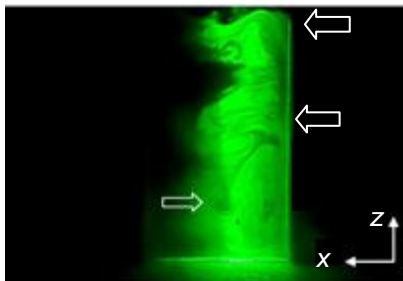


Figura 3 Visualización experimental del campo instantáneo del escoamento en el plano x-z en la calle del dosel urbano.

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados das predições numéricas com os modelos de turbulência KEP e TRW, plano x – z, respectivamente. A Figura 4 mostra que o modelo tensor de Reynolds ω conseguiu capturar os vórtices *standing* a montante da face frontal do primeiro prédio. Na região de esteira próxima do prédio maior o escoamento moveu-se em direção ao solo gerando uma pequena recirculação na face frontal do prédio a jusante, veja Figura 5.

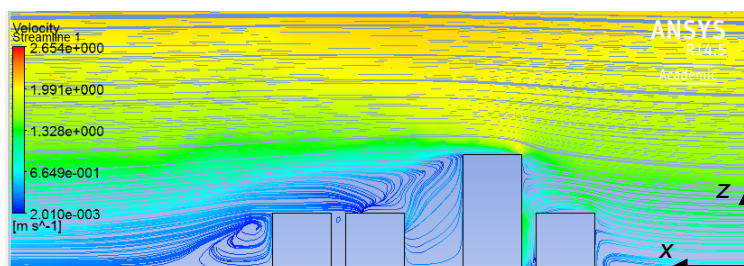


Figura 4 Modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ padrão: Visualización numérica del campo medio del escoamento en el plano x-z de la primera configuración urbana.

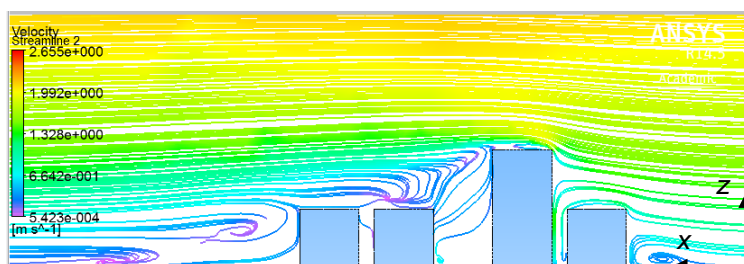


Figura 5 Modelo de turbulência tensor de Reynolds ω : Visualización numérica del campo medio del escoamento en el plano x-z de la primera configuración urbana.

A Figura 6 muestra una vista del campo instantáneo en el plano x-y, en la región del escoamento incidente y en el interior del dosel urbano. En la Figura 6(a) observó-se la formación de los vórtices *ferraduras* próximos al suelo. En el interior del dosel ocurrió la formación de dos regiones de recirculación aproximadamente simétricas con direcciones contrarias, vea Figura 6(b).

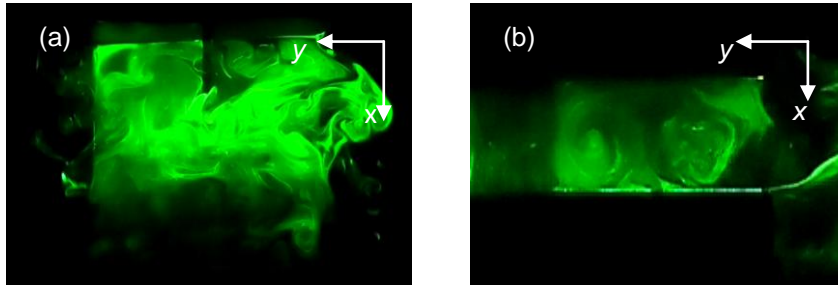


Figura 6 Visualización experimental del campo instantáneo del escoamiento en el plano $x-y$ con $z/H = 0,15$: (a) región incidente de los edificios y (b) entre los edificios en el interior del dosel.

A Figura 7 muestra los resultados de las simulaciones numéricas del campo medio con los modelos de turbulencia KEP e TRW en el plano $x - y$, respectivamente. En el interior del dosel urbano, ambos los modelos capturaron la formación de dos regiones de recirculación, conforme observado en los análisis experimentales.

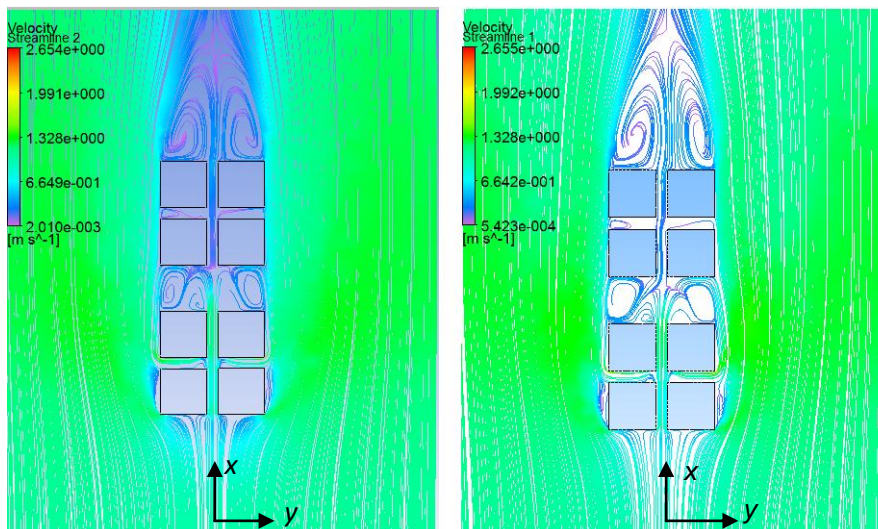


Figura 7 Visualización numérica del campo medio del escoamiento en el plano $x-y$ de la primera configuración urbana: (a) modelo de turbulencia $\kappa - \epsilon$ estándar y (b) tensor de Reynolds ω .

3.2 Segunda Configuración Urbana - $W/H = 1,0$

A Figura 8 muestra los resultados de la visualización experimental del escoamiento en la región incidente y en la región de estera del primer edificio de altura $2H$. Los resultados obtenidos mostraron la formación de los vórtices *standing* a montante y vórtices *shedding* en el nivel del techo en la región de estera.

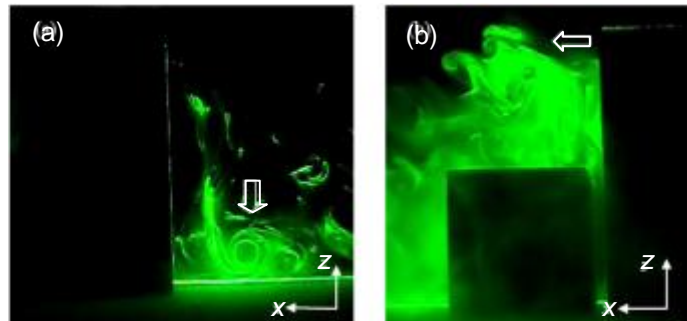


Figura 8 Visualización experimental del campo instantáneo en el plano $x-z$ de la segunda configuración urbana: (a) región incidente del primer prédio e (b) región de estela del primer prédio.

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados das simulações numéricas do campo médio com os modelos de turbulência KEP e TRW no plano $x - y$, respectivamente. Os resultados da Figura 9 mostram que ocorreu a formação de uma grande recirculação na face de trás do prédio mais alto. Além disso, no interior do dossel na face frontal do prédio a jusante ocorreu a formação de vórtices *standing*. Os resultados das simulações numéricas com o modelo TRW foram significativamente diferentes, na qual ocorreu uma grande recirculação no interior do dossel, com escala de comprimento da ordem de H , veja Figura 10.

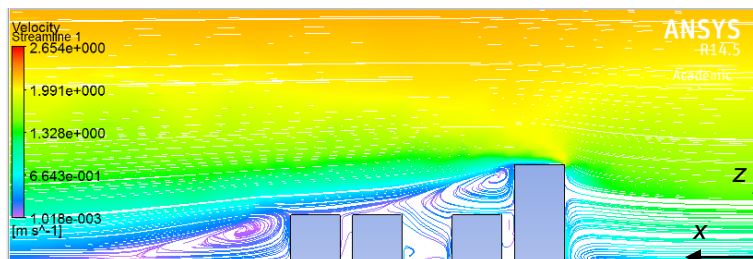


Figura 9 Modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ padrão: Visualización numérica del campo medio del escoamiento en el plano $x-z$ de la segunda configuración urbana.

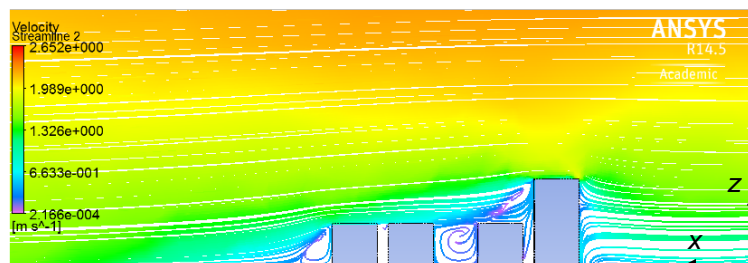


Figura 10 Modelo de turbulência tensor de Reynolds ω : Visualización numérica del campo medio del escoamiento en el plano $x-z$ de la segunda configuración urbana.

A Figura 11 mostra os resultados das simulações numéricas do campo médio com os modelos de turbulência KEP e TRW no plano $x - y$, respectivamente. No interior do dossel urbano, ambos os modelos capturaram a formação de duas regiões de recirculação aproximadamente simétricas, porém com circulações em sentidos opostos, Figura 11.

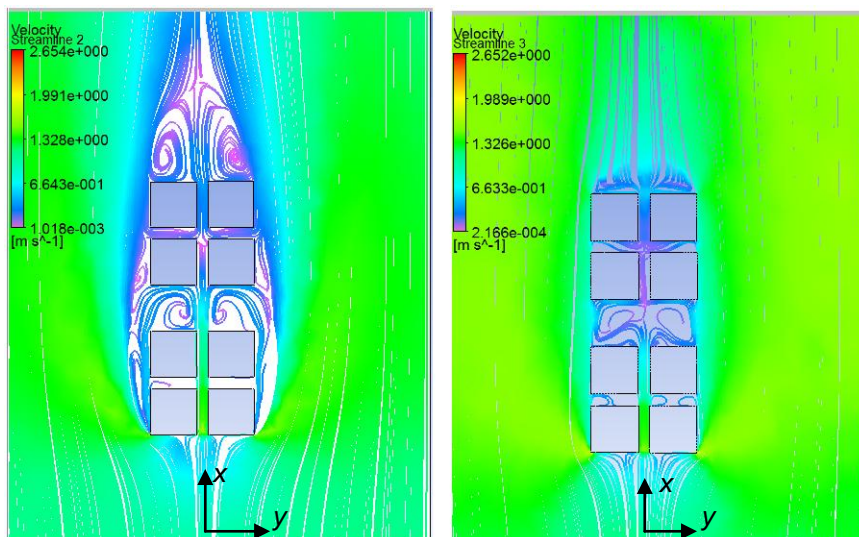


Figura 11 Visualización numérica del campo medio del escoamento en el plano x - y de la segunda configuración urbana: (a) modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$ estándar y (b) tensor de Reynolds ω .

3.3 Tercera Configuración Urbana – $WH = 1,0$

Na Figura 12 têm-se os resultados da visualização experimental do campo de vento na região incidente do primeiro prédio alto e na região de esteira do prédio alto imediatamente atrás. Na Figura 12(a) na face frontal do prédio a montante é possível notar com clareza que parte do escoamento moveu-se em direção ao telhado e parte moveu-se em direção ao solo. Na parede de trás do segundo obstáculo alto foi observado o padrão turbulento característico de zonas esteiras, veja 12(a).

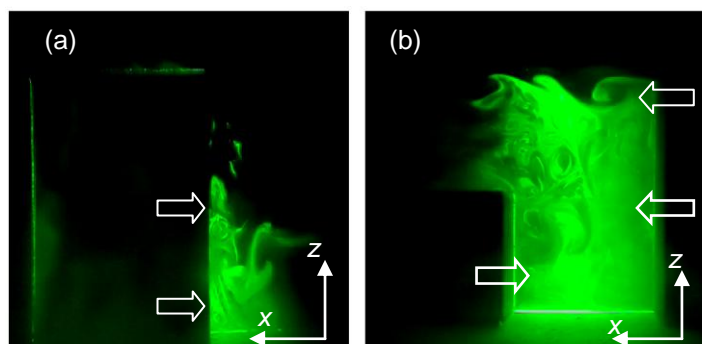


Figura 12 Visualización experimental del campo instantáneo en el plano x - z de la tercera configuración urbana: (a) región incidente del primer edificio y (b) región de estera del segundo edificio.

A Figura 13 mostra resultados das simulações físicas do campo de vento entre os prédios no interior do dossel urbano e na região de esteira do último prédio. Os resultados da Figura 13(a) mostraram uma interação do escoamento na região de esteira do prédio a montante com o escoamento na face frontal do prédio a jusante, característico de um escoamento com interferência de esteira.

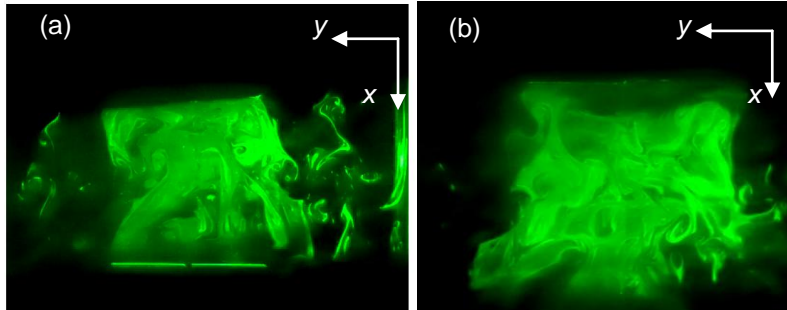


Figura 13 Visualización experimental del campo instantáneo en el plano x-y de la tercera configuración urbana:
(a) en el interior del dosel (b) región de estela del último prédio.

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados das predições numéricas com os modelos de turbulência TKE e TRW no plano x – z, respectivamente. Os resultados numéricos de ambos os modelos apresentaram diferenças significativas, tais como o padrão de recirculação no interior do dosel, ver Figuras 14 e 15. O modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ padrão superestimou o comprimento da região de estela do último prédio.

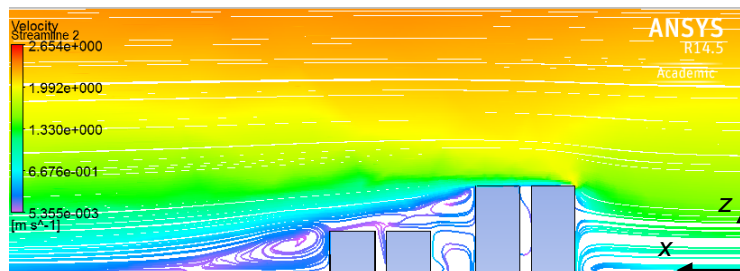


Figura 14 Modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ padrão: Visualização numérica do campo médio do escoamento no plano x-z da terceira configuração urbana.

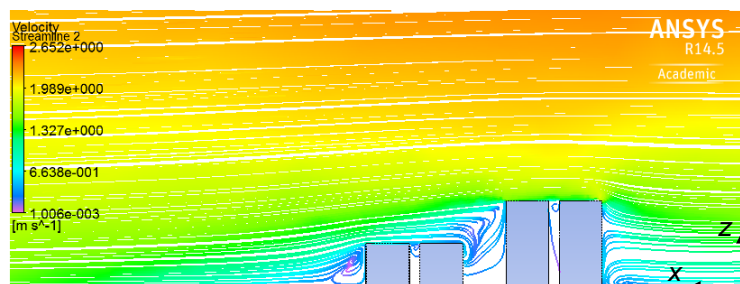


Figura 15 Modelo de turbulência tensor de Reynolds ω : Visualização numérica do campo médio do escoamento no plano x-z da terceira configuração urbana.

3.4 Quarta Configuração Urbana - $W/H = 2,0$

A Figura 16 mostra a visualização experimental do campo de vento na região de estela do primeiro prédio e no interior do dosel urbano para $W/H = 2,0$. Na Figura 16(a) observou-se as estruturas vorticosas características de região de estela. Com o aumento da razão de aspecto



ocorreu no interior do dossel urbano uma menor interferência entre a esteira do prédio a montante e a região incidente do prédio a jusante, veja Figura 16(b).

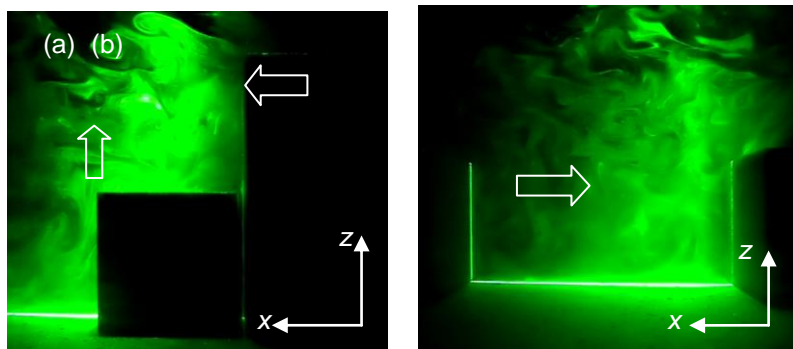


Figura 16 Visualização experimental do campo instantâneo no plano x-z da quarta configuração urbana: (a) região incidente do primeiro prédio e (b) no interior do dossel urbano.

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados das predições numéricas com os modelos de turbulência TKE e TRW, plano x – z para $W/H = 2,0$. Com o aumento da razão de aspecto ocorreu uma menor de interferência entre a esteira do prédio a montante e a face frontal do prédio a jusante. As predições numéricas de ambos os modelos apresentaram diferenças nos padrões de recirculação e escala de comprimento.

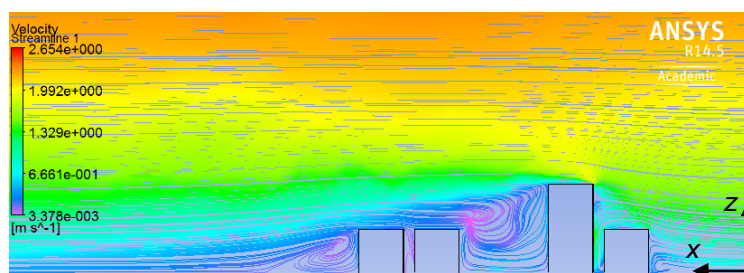


Figura 17 Modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão: Visualização numérica do campo médio do escoamento no plano x-z da quarta configuração urbana.

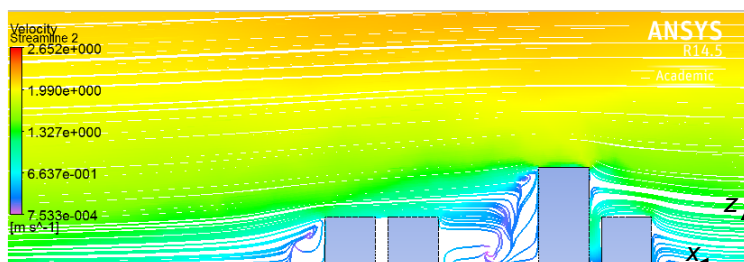


Figura 18 Modelo de turbulência tensor de Reynolds ω : Visualização numérica do campo médio do escoamento no plano x-z da quarta configuração urbana.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



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

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

4. CONCLUSÕES

Os resultados do campo instantâneo mostraram várias estruturas vorticosas nas proximidades dos obstáculos que são características do escoamento ao redor de corpos robustos em áreas urbanas. Apesar das diferenças entre os resultados numéricos obtidos com os modelos TKE e TRW, estes mostraram uma significativa relação entre a morfologia da área urbana e os efeitos que esta causa no campo de vento. A intensidade do vento na esteira dos obstáculos decresceu com o uso de obstáculos altos, formando uma zona de calma nesta região.

REFERÊNCIAS

- [1] Louka P, Belcher, S.E., Harrison, R.G. Modified street canyon flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **Vol.** 74, 485-493, 1998.
- [2] KaterinaNiachoua, SamuelHassidb, Mat Santamourisa, IroLivada, Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment, *Building and Environment* , **Vol.**43 (2008), 1373–1382, 2008
- [3] Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J., The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol.** 25, pp. 749–758, 2013
- [4] Radhi, H. e Sharples, S. Quantifying the domestic electricity consumption for air conditioning due to urban heat islands in hot arid regions. *Applied Energy*, **Vol.** 112, pp. 371-380, 2013
- [5] Kenjeres, S., Kuile, B., Modelling and Simulations of turbulent flows in urban areas with vegetation, *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, **Vol.** 123, pp. 43-55, 2013.
- [6] Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, **Vol.** 37, 155-182, 2003.
- [7] Lateral channeling within rectangular arrays of cubical obstacles, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, **Vol.** 98, pp. 377–385, 2010
- [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, pp. 9002-9012, 2007.
- [9] Eeftens, M., Beekhuizen, J., Beelen, R., Wang, M., Vermeulen, R., Brunekreef, B., Huss, A., Hoek, G., Quantifying urban street configuration for improvements in air pollution models. *Atmospheric Environment*, **Vol.** 72, pp. 1-9, 2013.
- [10] B.H. Souza, R.R.C. Paula, M.S.P. Gomes, F.C. Cezana, M.P. Brito, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM, The Interference Effect of Roof Profile on Wind Fields of Industrial Buildings, Ribeirão Preto, São Paulo, 2013.