



## SIMULAÇÃO FÍSICA DO TRANSPORTE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM ÁREAS URBANAS COM UMA FONTE PONTUAL LOCALIZADA NO TELHADO

Suelen M. Melo<sup>\*1</sup>, Pamella G. Paganoto<sup>1</sup>, Jamily F. Stocco<sup>1</sup>, Reginaldo R.C. de Paula<sup>1</sup>, Raquel Viana dos Santos<sup>1</sup>

<sup>\*1</sup> Laboratório de Energia – Instituto Federal do Espírito Santo – Ifes  
Av. Vitória, 1729 Vitória, Espírito Santo, Brasil  
correo-e: suelen\_mmelo@hotmail.com

### RESUMO

Em ambientes urbanos a deterioração da qualidade do ar está associada à emissão de poluentes atmosféricos provenientes de diversas fontes, tais como chaminés de indústrias e hospitais. O transporte e a dispersão destes poluentes sofrem grande influência de parâmetros meteorológicos, tais como a velocidade e direção do vento, bem como da morfologia do espaço urbano, caracterizada pela razão de aspecto  $W/H$ , onde  $W$  é a largura da rua e  $H$  é a altura dos prédios e da velocidade de exaustão dos contaminantes [4-6]. Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi analisar os efeitos de parâmetros geométricos e da velocidade de exaustão no transporte e dispersão da pluma de fumaça proveniente de uma chaminé localizada no telhado de uma edificação em uma área urbana idealizada. Os experimentos foram realizados em um túnel de vento de camada limite atmosférica em condições de estabilidade neutra com o vento externo incidindo numa direção perpendicular ao eixo da rua. O comportamento da pluma de poluentes foi investigado em sete configurações urbanas diferentes com duas velocidades de exaustão e duas razões de aspecto  $W/H$ , na qual foi estudada a influência de obstáculos altos a montante e/ ou a jusante da fonte emissora. As análises da visualização da pluma sugerem que em uma zona urbana formada por prédios baixos e homogêneos, um aumento da velocidade de exaustão causa uma melhor dispersão de poluentes. Entretanto, os resultados indicam que a altura dos prédios foi o parâmetro que mais afetou o transporte de fumaça, pois na presença de prédios altos a jusante da fonte emissora, a pluma foi defletida em direção à zona de recirculação que se formou na rua. Qualitativamente, mesmo com o aumento da razão de aspecto  $W/H$ , este comportamento foi observado, porém, com uma melhor dispersão da pluma de fumaça.

**Palavras chaves:** *Poluição atmosférica, camada limite atmosférica, túnel de vento, áreas urbanas.*



## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento industrial e urbano está associado ao aumento da emissão de poluentes atmosféricos, tais como gases tóxicos e odores, o que conseqüentemente, traz danos ao meio ambiente e à saúde humana [1]. Em grandes centros urbanos fontes estacionárias podem ser localizadas no telhado de prédios comerciais, hospitais e indústrias. A emissão de contaminantes provenientes destas chaminés pode afetar a qualidade do ar no interior do prédio emissor e das edificações vizinhas [2]. O transporte e dispersão desses poluentes são diretamente afetados por parâmetros meteorológicos, tais como, velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, pela estrutura arquitetônica do espaço urbano e também da localização, altura da fonte emissora e efeitos aerodinâmicos gerados pela chaminé [3].

O padrão de dispersão do escoamento dentro de um dossel urbano depende de sua razão de aspecto  $W/H$ , onde  $W$  é a largura da rua e  $H$  é a altura dos prédios, do formato do prédio e do telhado [4]. Na literatura vários estudos mostraram uma forte relação entre a razão de aspecto e os níveis de dispersão [5,6]. Para uma razão de aspecto relativamente grande os vórtices formados nas vizinhanças dos prédios não interagem muito com o vento externo acima da zona urbana e não contribuem significativamente para a dispersão dos poluentes. Conforme a largura da rua é aumentada, os níveis de dispersão tendem a aumentar devido a um melhor sistema de ventilação.

A dispersão de contaminantes também pode ser influenciada pela razão das alturas dos prédios. Em um estudo [6], foram realizadas simulações numéricas para diversas configurações urbanas com o uso do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  padrão. Os autores investigaram a influência da razão de alturas  $H_2/H_1$ , sendo  $H_2$  a altura do prédio a jusante, e  $H_1$  a altura do prédio a montante do escoamento, com uma fonte de emissão localizada no meio da rua. Os resultados mostraram que quando a altura do prédio a jusante superava a altura da pluma de poluentes, a concentração destes dentro da área urbana aumentava significativamente.

A altura e localização da fonte emissora tem uma significativa influência no transporte e dispersão de poluentes em áreas urbanas. Por exemplo, experimentos de túnel de vento com fontes localizadas no telhado e com alta velocidade de exaustão, mostraram que um aumento da altura da chaminé gera uma redução da concentração de poluentes nas áreas próximas [7]. Entretanto, experimentos de campo [8], mostraram que mesmo com altas velocidades de exaustão e chaminés com elevadas alturas, a concentração de poluentes em determinados locais estava acima de níveis toleráveis. Quando se tem um obstáculo a jusante do ponto de emissão, observa-se um aumento da concentração de poluentes na zona de recirculação, isto tende a piorar com o aumento da altura do corpo [2].



# 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

Vários trabalhos têm utilizado experimentos de túnel de vento para investigarem o transporte e a dispersão de poluentes em regiões urbanas idealizadas, pois se podem controlar diferentes parâmetros [9-12]. Esse tipo de estudo permite prever o comportamento dos ventos locais em ambientes de diferentes configurações, mostrando diretrizes para uma melhoria do sistema de ventilação natural e redução dos impactos ambientais causados pela emissão de poluentes.

[9] realizaram simulações em túnel de vento e investigaram os efeitos que obstáculos próximos a uma chaminé localizada no telhado poderiam causar na dispersão de poluentes. Os resultados mostraram que a presença de um prédio mais alto a montante e de outro a jusante dificultou a dispersão da pluma. Conseqüentemente ocorreu um aumento dos níveis de concentração de poluentes no telhado do prédio emissor e na esteira próxima do prédio a montante.

Desta forma, neste trabalho foi investigado qualitativamente o comportamento da pluma de poluentes proveniente de uma chaminé localizada no centro do telhado de uma edificação de uma área urbana idealizada. O objetivo principal foi identificar as influências de parâmetros geométricos e da velocidade de exaustão no transporte e dispersão da pluma de fumaça.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos da dispersão de poluentes em uma área urbana foram executados em um túnel de vento de camada limite atmosférica, em condições de estabilidade neutra. Este tem uma seção de teste de (2,0 x 0,5 x 0,5) m e está localizado no Laboratório de Energia do IFES, Vitória. Para configuração da zona urbana, utilizaram-se 6 cubos de acrílico (6 x 6 x 6) cm, 3 paralelepípedos (6 x 6 x 12) cm e 3 paralelepípedos (6 x 6 x 18) cm. O perfil de velocidade vertical do vento médio obedeceu a uma lei de potência dada por:

$$u(z) = u_o \left( \frac{z}{z_o} \right)^p \quad (1)$$

onde,  $z$  é a altura,  $u(z)$  é a velocidade média do vento medida em uma altura  $z$  acima da superfície,  $u_o$  é a velocidade média na altura dos prédios,  $z_o$  é altura dos obstáculos tomada como referência, e  $p = 0,25$  é o parâmetro de rugosidade para ventos que se desenvolvem em regiões urbanas de acordo com a Categoria IV da NBR-6123/88 [13].

Foram determinadas as velocidades médias na saída da fonte emissora para o cálculo da vazão de lançamento de poluentes. Para cada configuração de zona urbana foram testadas duas vazões de saída  $Q_1 = 0,0082$  l/s e  $Q_2 = 0,030$  l/s, correspondente às velocidades de exaustão de  $V_1 = 0,51$  m/s (baixa velocidade) e  $V_2 = 1,89$  m/s (alta velocidade), respectivamente. As medições foram



# 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

realizadas com um tubo de Pitot (sonda de 3mm) acoplado a um manômetro digital (TSI, EBT720). A Figura 1 mostra uma representação esquemática da fonte emissora e sua localização.

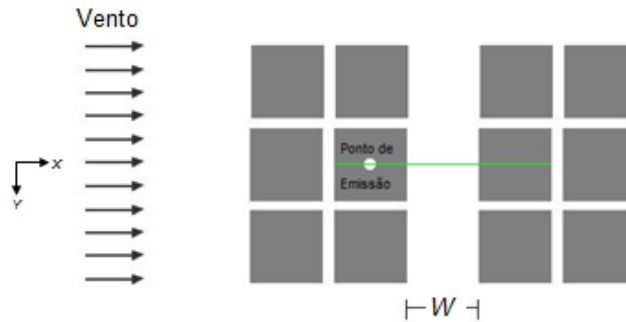


Figura 1: Representação esquemática da morfologia da área urbana no plano x-y.

Com uma fonte localizada no nível do telhado de um obstáculo,  $H_f = H$ , foram simuladas diferentes configurações de zona urbana com duas razões de aspecto  $W/H$ , onde  $H_f$  é a altura da fonte,  $H$  é a altura dos prédios cúbicos e  $W$  é a largura da rua. Durante a realização dos experimentos, o vento externo incidiu perpendicularmente ao eixo central da rua. Para o cálculo dos números de Reynolds considerou-se como escala característica de comprimento, as alturas dos prédios ( $H_1 = 0,06$  m,  $H_2 = 0,12$  m e  $H_3 = 0,18$  m) e como escala característica de velocidade, as velocidades médias do vento nas alturas dos prédios, respectivamente,  $V_1 = 0,23$  m/s;  $V_2 = 0,33$  m/s e  $V_3 = 0,43$ , obtendo-se assim,  $Re_{H1} = 9,0 \times 10^2$ ;  $Re_{H2} = 2,6 \times 10^3$  e  $Re_{H3} = 4,8 \times 10^3$ , respectivamente. Essas velocidades foram medidas na direção do escoamento principal a uma distância  $4H_1$  a montante dos prédios.

Para a visualização da pluma de poluentes foi utilizada a técnica de plano de luz de laser verde (500 mW e  $\lambda = 532$  nm) e para captura das imagens, uma câmera digital Fujifilm HS 10 com uma velocidade de captura de 240 frames por segundo. Na Figura 2 tem-se uma representação da seção de testes do túnel de vento e metodologia utilizada para a visualização da pluma de poluentes.

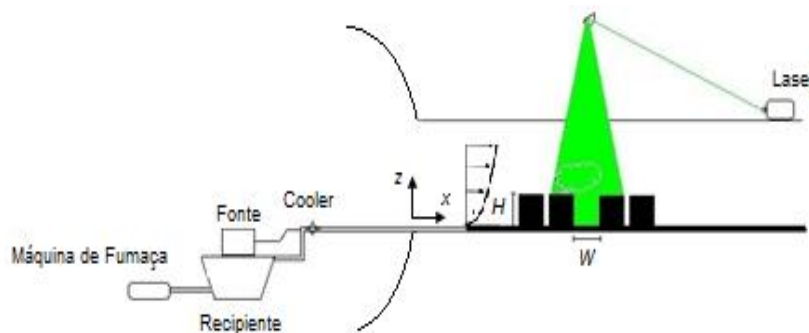


Figura 2: Representação esquemática da seção de testes do túnel de vento com o aparato experimental no plano x-z.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, sete diferentes configurações de dosséis urbanos idealizados com uma fonte localizada no nível do telhado foram investigadas para duas velocidades de exaustão,  $V_1 = 0,51$  m/s (baixa velocidade) e  $V_2 = 1,89$  m/s (alta velocidade).

A Figura 3 apresenta os resultados da visualização da emissão de fumaça para um ambiente urbano formado por doze prédios cúbicos de altura  $H$  e razão de aspecto  $W/H = 1$ . No interior da rua e abaixo do nível do telhado dos prédios tem-se a formação de um grande vórtice, característico do regime de escoamento *skimming* de acordo com os trabalhos realizados por [10]. Os resultados da visualização mostram que para  $V_1$  a pluma de fumaça foi capturada pela recirculação do escoamento entre os prédios, causando assim um acúmulo de poluentes nesta região. Para  $V_2$  a pluma tem inércia suficiente para não ser defletida em direção à rua, ocasionando uma melhor dispersão de poluentes. Qualitativamente, o *downwash* da pluma (decaimento da pluma) ocorreu para uma altura  $H_D \cong 0,3 H$ , onde  $H_D$  é a altura do *downwash*.

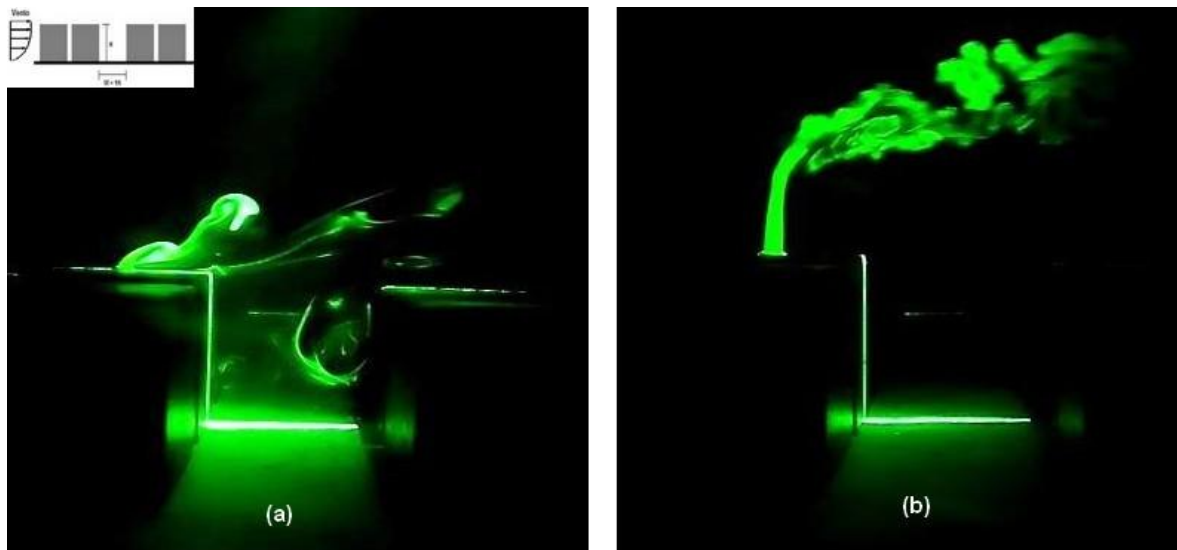


Figura 3: Região urbana formada por prédios cúbicos e  $W/H_f=1$ . (a)  $V_1 = 0,51$  m/s e (b)  $V_2 = 1,89$  m/s.

As Figuras 4 e 5 mostram os resultados da visualização da pluma para regiões urbanas com prédios altos ( $H = 2H_f$ ) e prédios mais altos ( $H = 3H_f$ ), localizados a montante da fonte emissora de fumaça e razão de aspecto  $W/H = 1$ . Para a velocidade  $V_1$  a pluma de fumaça foi capturada na zona de recirculação da esteira formada pelos obstáculos altos a montante, conforme mostram as Figuras 4(a) e 5(a). Qualitativamente, não se observou um bom transporte de poluentes. Na Figura 4(b), observou-se que com o aumento da velocidade de exaustão a pluma escapou da região de



# 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

recirculação do prédio a montante e seu *downwash* ocorreu para  $H_D \cong 0,6 H_f$ . Entretanto, os resultados mostraram que mesmo com o aumento da velocidade de exaustão a pluma de fumaça foi captura pela esteira do prédio mais alto a montante, causando um acúmulo de poluentes próximos a fonte emissora, conforme mostra a Figura 5(b).

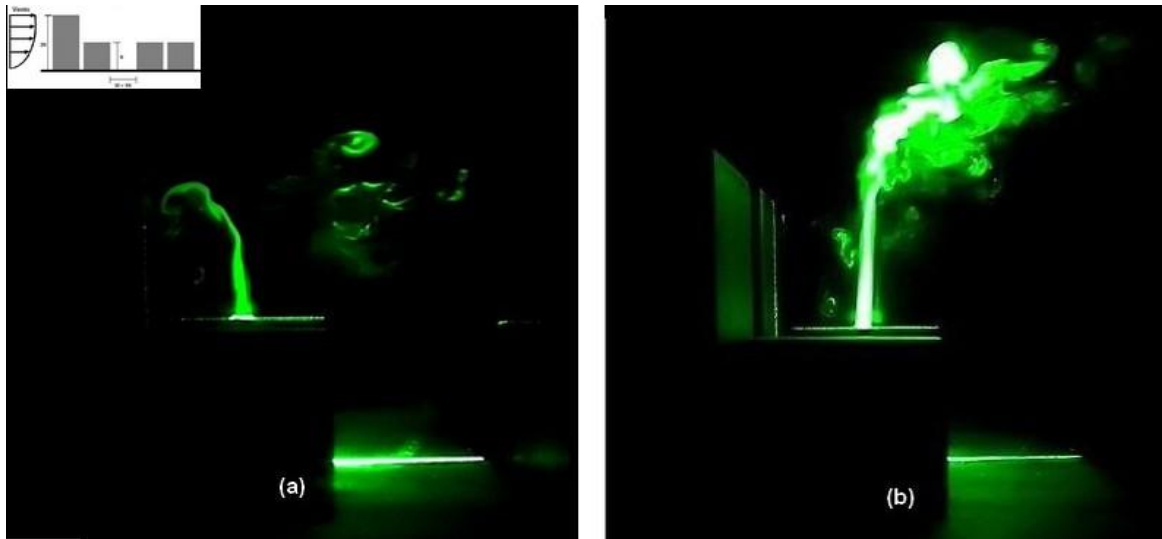


Figura 4: Região Urbana formada por prédios altos ( $H=2H_f$ ) à montante do ponto de emissão e  $W/H_f=1$ . (a)  $V_1 = 0,51 \text{ m/s}$  e (b)  $V_2 = 1,89 \text{ m/s}$ .

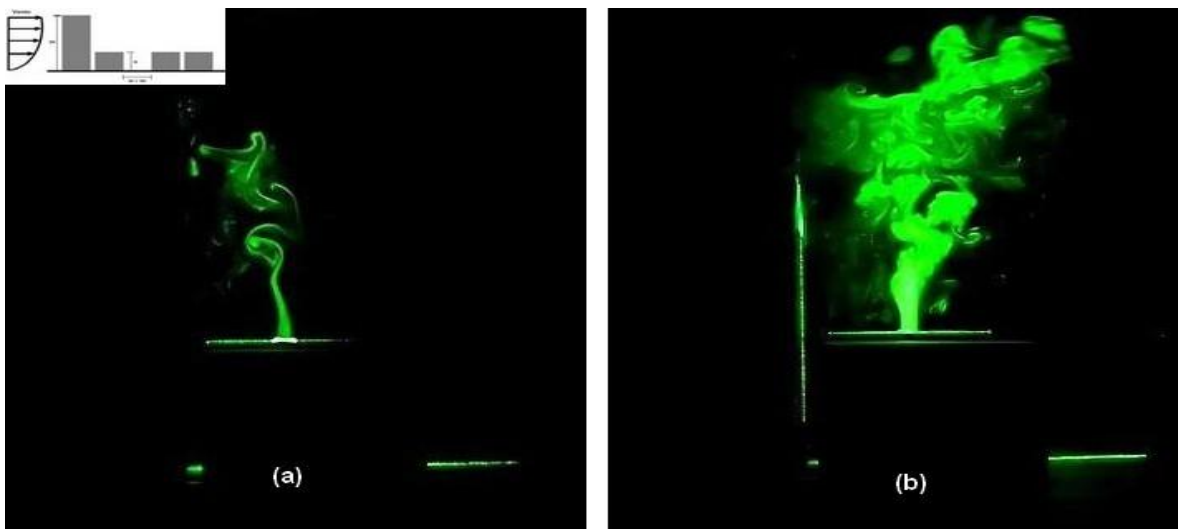


Figura 5: Região Urbana com prédios mais altos ( $H=3H_f$ ) à montante do ponto de emissão e razão de aspecto  $W/H_f=1$ . (a)  $V_1 = 0,51 \text{ m/s}$  e (b)  $V_2 = 1,89 \text{ m/s}$ .



# 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

As Figuras 6 e 7 mostram os resultados da visualização da pluma para  $W/H = 1,0$ , com prédios altos ( $H = 2H_f$ ) e prédios mais altos ( $H = 3H_f$ ), localizados a jusante da fonte emissora de fumaça. Para uma  $V_1 = 0,51$  m/s a pluma foi capturada pela grande recirculação gerada na rua abaixo do nível do telhado dos prédios, conforme mostram as Figuras 6(a) e 7(a). Na Figura 6(b) os resultados mostram que com o aumento da vazão, a pluma escapou da zona de recirculação do prédio emissor. Porém, devido à presença do prédio alto ( $H = 2H_f$ ) a jusante, parte dos poluentes foi defletida em direção ao solo e parte foi transportada a sotavento. Com o aumento da altura do prédio a jusante da fonte emissora, a pluma de fumaça foi totalmente defletida em direção ao solo e engolfada pela grande recirculação que ocorreu na rua, conforme mostra a Figura 7(b).

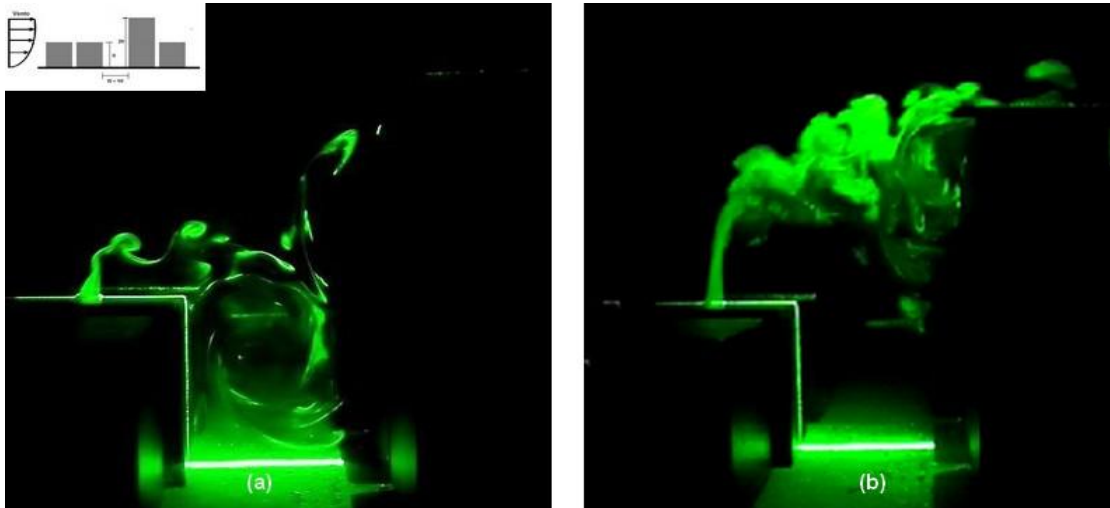


Figura 6: Região Urbana com prédios altos ( $H=2H_f$ ) à jusante do ponto de emissão e razão de aspecto  $W/H_f=1$ . (a)  $V_1 = 0,51$  m/s e (b)  $V_2 = 1,89$  m/s.

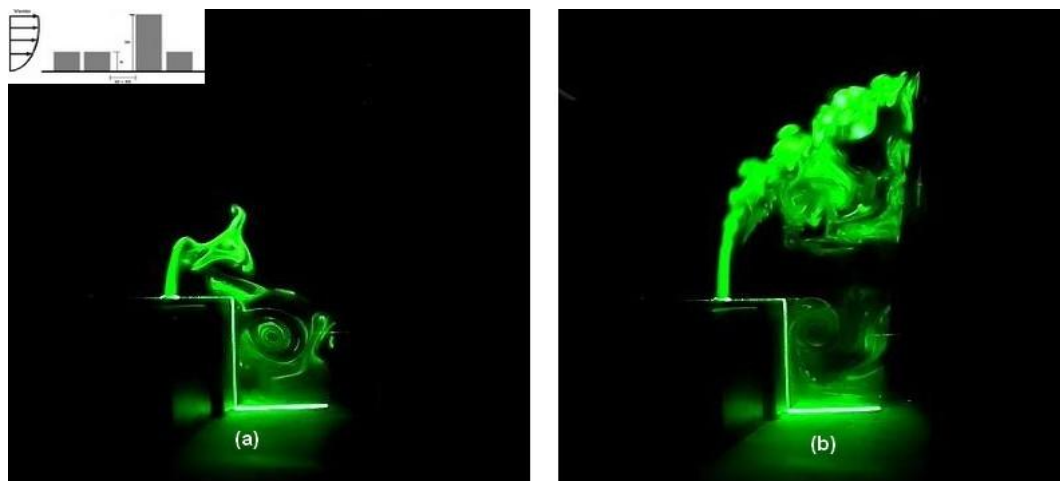


Figura 7: Região Urbana com prédios mais altos ( $H=3H_f$ ) à jusante do ponto de emissão e razão de aspecto  $W/H_f=1$ . (a)  $V_1 = 0,51$  m/s e (b)  $V_2 = 1,89$  m/s.



# 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

As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados da visualização da pluma para  $W/H = 2$ , com obstáculos altos de altura  $2H_f$  e  $3H_f$ , localizados a jusante da pluma. Os resultados da Figura 8(a) mostram que, para  $V_1 = 0,51$  m/s ocorreu um transporte da pluma a jusante da fonte emissora no nível do telhado e parte da fumaça foi defletida em direção à esteira do prédio emissor. Com o aumento da vazão, observou-se um melhor transporte de poluentes a sotavento e o *downwash* da pluma ocorreu a  $H_D \cong 0,20 H_f$ . Devido à presença de um obstáculo alto a jusante da fonte emissora, a pluma de fumaça foi capturada na região de recirculação da esteira do prédio emissor.

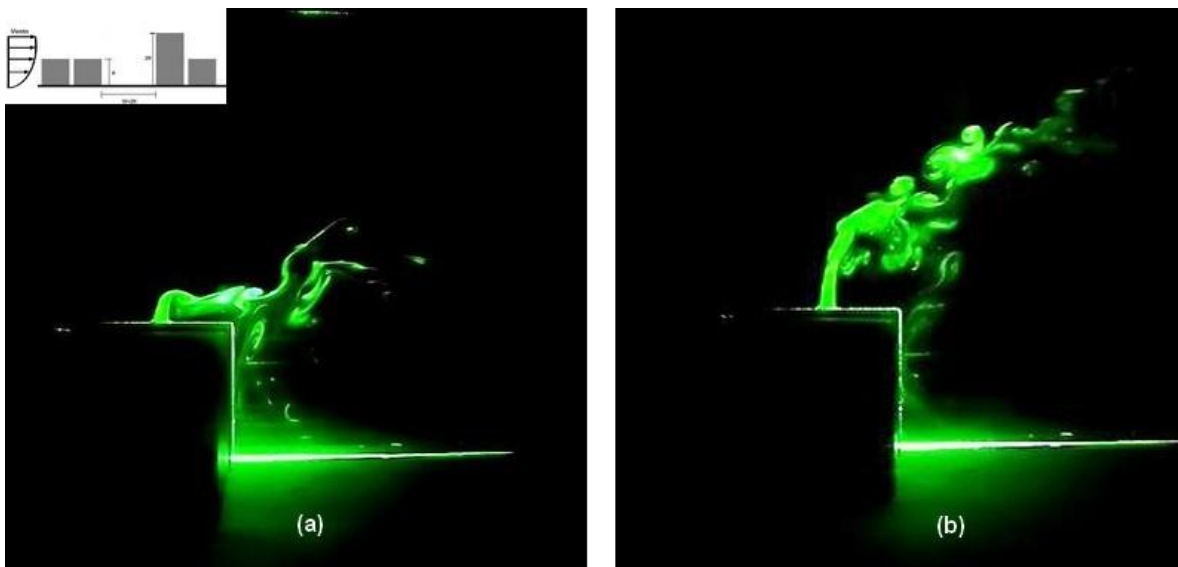


Figura 8: Região Urbana com prédios altos ( $H=2H_f$ ) à jusante do ponto de emissão e razão de aspecto  $W/H_f=2$ . (a)  $V_1 = 0,51$  m/s e (b)  $V_2 = 1,89$  m/s.

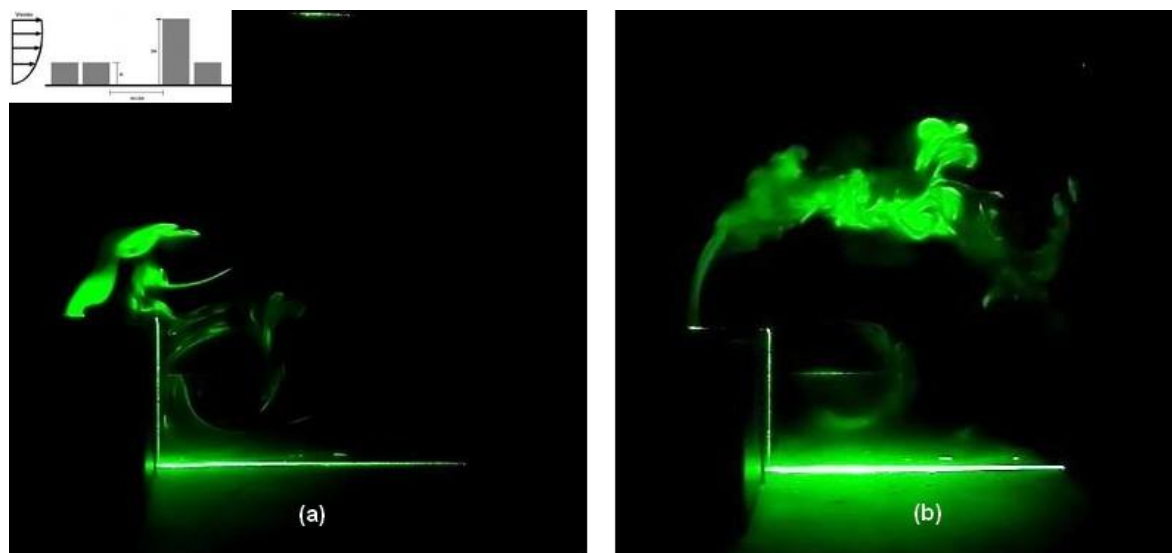


Figura 9: Região Urbana com prédios altos ( $H=3H_f$ ) à jusante do ponto de emissão e razão de aspecto  $W/H_f=2$ . (a)  $V_1 = 0,51$  m/s e (b)  $V_2 = 1,89$  m/s.



#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o comportamento de uma pluma de fumaça proveniente de uma fonte localizada no telhado de um prédio cúbico foi analisado através de simulações em túnel de vento. Foram consideradas diferentes configurações de ambientes urbanos para investigar a influência de parâmetros geométricos e da velocidade de exaustão na dispersão de poluentes. Os resultados sugerem que na presença de prédios baixos ( $H = H_f$ ) e altos a montante do ponto de emissão ( $H = 2H_f$ ), um aumento da vazão na saída da fonte pode gerar uma boa dispersão de poluentes. Estes resultados estão de acordo com experimentos realizados por [14]. Entretanto, para uma razão de aspecto  $W/H = 1,0$ , na presença de prédios mais altos a montante ( $H = 3H_f$ ) os poluentes foram capturados pela zona de recirculação na esteira destes obstáculos, mesmo com o aumento da velocidade de exaustão. Quando os prédios de alturas ( $H = 2H_f$ ) e ( $H = 3H_f$ ) estavam localizados a jusante do ponto de emissão para uma zona urbana  $W/H = 1,0$ , foi observada que a pluma de poluentes foi defletida em direção a região de recirculação que se formou na rua. Mesmo com o aumento da razão de aspecto para  $W/H = 2,0$  este comportamento foi observado, entretanto, os resultados sugerem que ocorreu uma melhor dispersão de poluentes.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] Braga, A., Pereira, L. A. A., & Saldiva, P. H. N. (2002). Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia, UNICAMP, vol. 18, 2002.
- [2] Hajra, B., Stathopoulos, T., A wind tunnel study of the effect of downstream buildings on near-field pollutant dispersion, *Building and Environment*, Vol. 52, p. 19-31, 2012.
- [3] Yassin, M. F., Experimental study on contamination of building exhaust emissions in urban environment under changes of stack locations and atmospheric stability, *Energy and Buildings*, Vol. 62, p. 68-77.
- [4] Louka, P., Belcher, S.E., Harrison, R.G., Modified street canyon flow, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 74-76, p. 485-493, 1998.
- [5] Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry K. K., Wind tunnel simulation studies in dispersion at urban street canyons and intersections – a review, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 93, p. 697-717, 2005.
- [6] Chan, A. T., So, E.S.P., Samad, S.C., Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, p. 5681-5691, 2001.



# 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

- [7] Gupta, A., Stathopoulos, T., Saathoff P., Wind tunnel investigation of the downwash effect of a rooftop structure on plume dispersion, Atmospheric Environment, Vol. 46, p. 496-507, 2012.
- [8] Saathoff, P., Stathopoulos, T., Lazure, L., Peperkamp, H., The influence of a rooftop structure on the dispersion of exhaust from a rooftop stack, ASHRAE Transactions, Vol. 108 (2), p. 1029-1038, 2002.
- [9] Hajra, B., Stathopoulos, T., Bahloul, A., Assessment of pollutant dispersion from rooftop stacks: ASHRAE, ADMS and wind tunnel simulation, Building and Environment, Vol. 45, p. 2768-2777, 2010.
- [10] Pavageau, M., Schautzmann, M., Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon, Atmospheric Environment, Vol. 33, p. 3961-3971, 1999.
- [11] Johnson, G. T., Hunter, L. J., Urban wind flows: wind tunnel and numerical simulations—a preliminary comparison, Environmental Modelling & Software, Vol. 13, p. 279-286, 1998.
- [12] Chang, C-H., Meroney, R. N., Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, Vol. 91, p. 1141-1154, 2003.
- [13] Blessmann, J., O Vento na Engenharia Estrutural, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.
- [14] D.J. Wilson, I. Fabris, J. Chen, M. Ackerman, Adjacent building effects on laboratory fume hood exhaust stack design, ASHRAE Transaction, Vol. 104, p. 1012–1027, 1998.

## Agradecimientos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a coordenação do Curso Técnico de Mecânica do Ifes, Campus Vitória.