

# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM MODELO COM ARESTAS VIVAS

**Adrián R. Wittwer**

Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina  
[a\\_wittwer@yahoo.es](mailto:a_wittwer@yahoo.es)

**Gustavo J. Z. Núñez**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

**Elvis A. Carpegiani**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

**Acir M. Loredou-Souza**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

**Edith B. Camaño Schettini**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil

*Resumo.* O escoamento de ar em torno de um obstáculo apresenta características totalmente diferentes às do escoamento incidente. No caso do escoamento em zonas próximas a edifícios, o problema é importante e influi nas cargas provocadas pelo vento, nos processos de dispersão e na definição da localização de helipontos. As zonas de recirculação e a esteira podem provocar efeitos localizados e ao nível do solo, de difícil previsão. Como não existe um critério único para estabelecer as regiões características do escoamento nas zonas próximas a edifícios, foram realizadas uma série de medições com anemômetro de fio quente, previamente ao desenvolvimento de um projeto mais amplo que envolve experimentos de dispersão atmosférica. A análise até aqui realizada limita-se à determinação da camada de vórtices, zonas de recirculação e esteira sobre o modelo.

**Palavras chave:** túnel de vento, turbulência, anemômetro de fio quente, separação, camada de vórtices.

## 1. Introdução

Uma descrição qualitativa do escoamento de ar, em um plano vertical sobre uma forma de edificação rombuda e com arestas vivas, é mostrada na Fig. (1). O escoamento na região superior pode ser caracterizado por padrões de turbulência bem definidos, representados por três regiões: uma primeira região afastada do prédio (chamada de escoamento principal) com turbulência de intensidade relativamente baixa. Uma região de recirculação, próxima ao topo, com intensidades de turbulência mais altas, onde se desenvolvem vórtices contra-rotativos de eixo paralelo ao prédio, localizada imediatamente sobre o edifício e correspondente ao descolamento do escoamento quando este encontra a aresta viva. Uma terceira região turbulenta, composta por uma fina camada de vórtices de grande intensidade, localizada entre as duas anteriores.

Esta camada de vórtices (camada de mistura) está caracterizada por um escoamento altamente turbulento, contendo considerável energia em uma faixa de frequências associada ao desprendimento de vórtices, e por um gradiente de velocidades bem acentuado entre o escoamento principal e a velocidade relativamente mais baixa da zona de recirculação. Uma inversão na direção do escoamento é encontrada nas regiões mais baixas da recirculação. A camada de mistura, originada no ponto de descolamento, aumenta sua espessura na direção do escoamento principal, e a difusão da camada de vórtices é acompanhada por uma redução da velocidade média e do gradiente vertical de velocidades médias. A intensidade da turbulência dentro da camada sofre uma redução mais gradual.

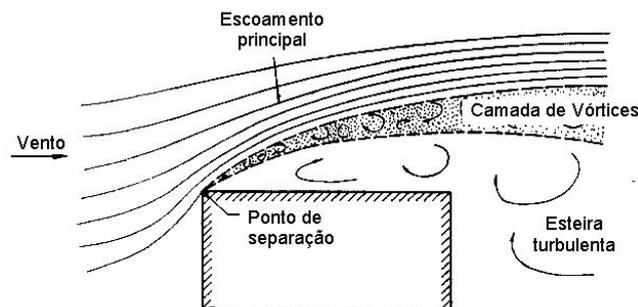


Figura 1. Esquema do escoamento sobre um corpo com arestas vivas (Davenport et al., 1968).

Uma representação da variação vertical da velocidade do vento nesta região é mostrada na Fig. (2). As flutuações da velocidade do vento são muito pronunciadas na camada de vórtices, de menor intensidade na região de recirculação e ainda menores na região do escoamento principal.

A representação gráfica do escoamento tridimensional e direções de vento oblíquas é bem mais complexa devido à formação de vórtices cônicos e desprendimento de vórtices de grande escala oriundos das arestas laterais dos prédios. A Fig. (3) ilustra os denominados vórtices de topo e a correspondente distribuição de pressões sobre a superfície onde atuam. Os vórtices têm uma forma cônico-helicoidal, formando-se a partir da quina da edificação situada a barlavento. As pressões negativas geram cargas localizadas importantes e, no caso de processos de difusão, podem provocar acumulação de poluentes com concentrações elevadas.

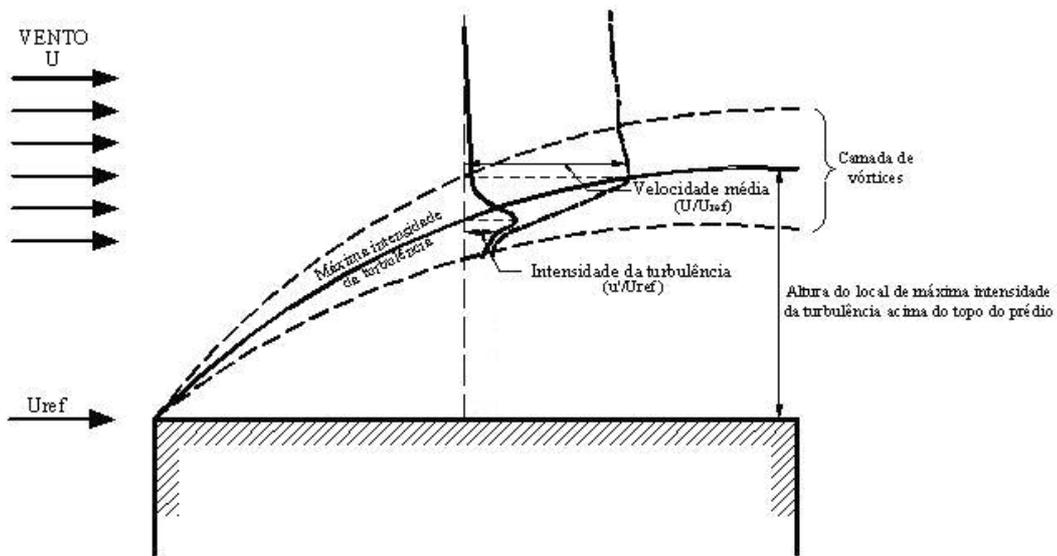


Figura 2. Descrição qualitativa da velocidade do vento em escoamento bi-dimensional no topo de uma edificação com arestas vivas.

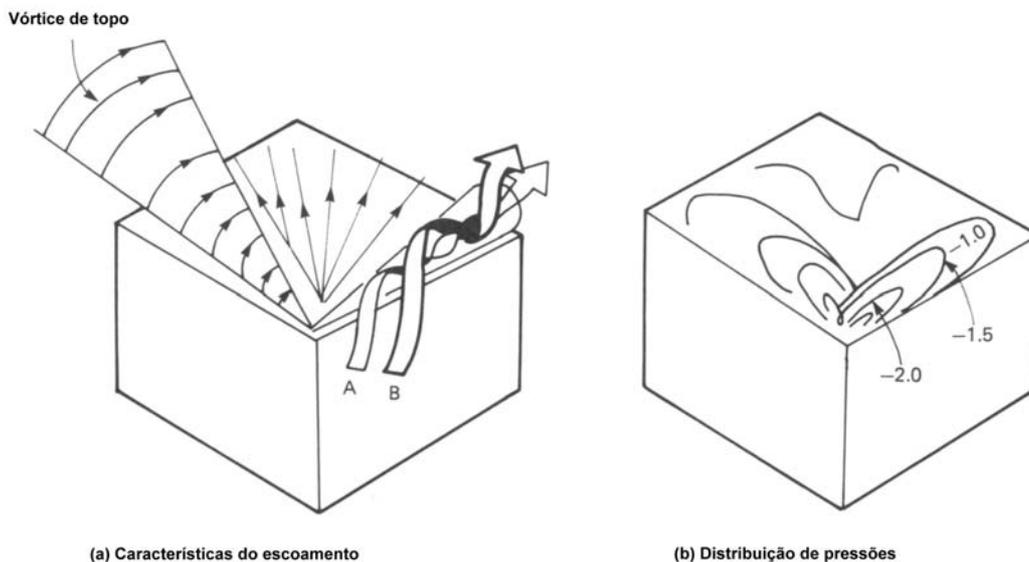


Fig. 3. Vórtices de topo (Cook, 1990)

Este problema é analisado para determinar alturas mínimas de fontes de emissão e, posteriormente, para estudar os problemas locais de dispersão de gases (Meroney et al., 1999). Ante a presença de estruturas, a pluma deve-se elevar sobre as zonas de cavidade de sucção e da esteira que se produzem detrás da estrutura, para evitar as altas concentrações (Hanna, 1982). Como não existe um critério único para estabelecer as regiões características do escoamento nas zonas próximas a edifícios, se deve realizar uma série de medições com anemômetro de fio quente prévias ao projeto dos experimentos de dispersão. A análise até aqui realizada limita-se à determinação da camada de vórtices, zonas de recirculação e esteira sobre o modelo. Posteriormente, serão analisadas as características da esteira a sotavento do modelo e a extensão de seus efeitos.

O mesmo tipo de estudo é utilizado na avaliação das características do vento na região de helipontos (Loredo Souza & Camaño Schettini, 2002). No caso de um heliponto construído nas proximidades de outras edificações, recomenda-se a verificação da existência de zonas de turbulência.

## 2. Descrição dos experimentos

Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* (Fig. 4), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982). Neste caso, as características do vento incidente foram simuladas através de uma grelha colocada no início da câmara de ensaios. O escoamento resultante é aproximadamente uniforme e a intensidade de turbulência local mantém-se na ordem de 5 % na zona do posicionamento do modelo.

Para o estudo das características do escoamento foi construído o modelo representado na Fig. (5). As dimensões do modelo foram  $A=B=320$  mm e  $C=480$  mm. As velocidades em pontos selecionados sobre o modelo foram medidas através de um sistema de anemometria a fio quente TSI. O sensor foi montado em um sistema de posicionamento com controle externo para obter medidas da velocidade do vento em diferentes pontos da região de interesse. Medições da velocidade média do vento e das flutuações destas velocidades, ambas normalizadas pela velocidade média no topo do modelo, foram realizadas em diversas posições. Na Fig. (5), na vista superior, são indicadas as distintas posições nas quais foram obtidos os perfis verticais de velocidade média e intensidade de turbulência, para as direções de vento normal às arestas A ou B, e oblíqua (a  $45^\circ$ ).

Para a análise das flutuações de velocidade, em cada ponto de medição foram tomadas amostras de 30 segundos de duração com uma frequência de aquisição de 1024 Hz. Devido ao fato de não ter sido realizada uma filtragem analógica do sinal do anemômetro, nos espectros resultantes deve ser considerado o erro introduzido pelo efeito de “aliasing” nas frequências próximas aos 500 Hz (Wittwer & Möller, 2000).



Fig. 4. Túnel de vento “Prof. Joaquim Blessmann” do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, UFRGS.

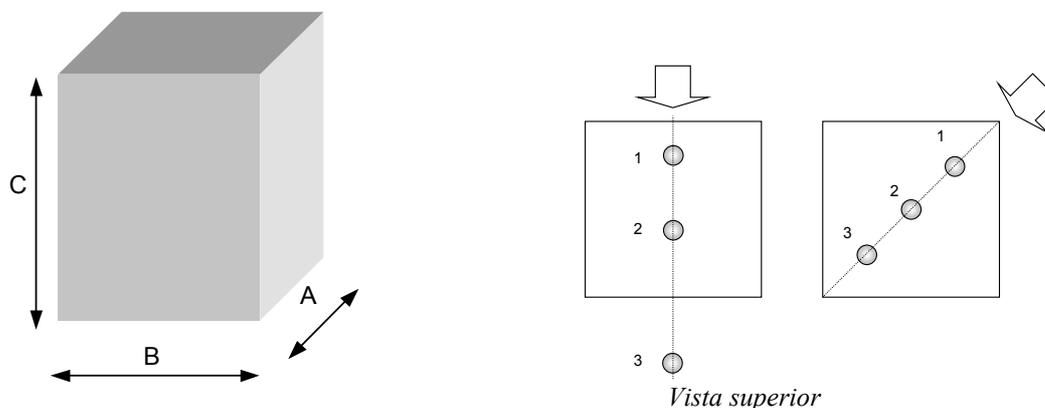


Fig. 5. Dimensões do modelo utilizado e posições de medição.

### 3. Resultados

Na Fig. (6) são apresentados os perfis de velocidade média adimensional  $U/U_{ref}$  e de intensidade de turbulência normalizada  $u'/U_{ref}$  (%), correspondentes à direção de vento normal a uma das arestas superiores do modelo, sendo  $u'$  o desvio padrão da flutuação de velocidade. Da mesma forma, na Fig. (7) são apresentados os perfis correspondentes à direção de vento oblíqua (45°). Durante os testes, a velocidade de referência  $U_{ref}$ , medida à altura do modelo, foi de 30 m/s. A distância  $z$  é medida desde a parte superior do modelo,  $l$  é a distância longitudinal desde a aresta a barlavento do modelo, a partir da qual são situadas as posições correspondentes a direção normal, e  $d$  é a distância sobre a diagonal para as posições correspondentes a direção oblíqua. As distâncias  $z$ ,  $l$  e  $d$  são adimensionalizadas com a dimensão da aresta  $B=320$  mm. O número de Reynolds, determinado pela expressão,

$$Re_B = \frac{U_{ref} B}{\nu} \quad (1)$$

têm um valor de  $6.19 \times 10^5$ , sendo  $\nu$  a viscosidade cinemática do ar.

A análise dos perfis obtidos permite determinar as linhas de máxima velocidade média e intensidade de turbulência para as duas direções de vento representadas na Fig. (8). Essas linhas permitem delimitar a região do escoamento principal e estimar a espessura da camada de vórtices. Assim, ficariam definidas as três regiões do escoamento sobre o modelo.

O escoamento tridimensional produzido na direção de vento oblíqua não pode ser analisado a partir dos três perfis obtidos sobre a diagonal. Nesta direção de vento incidente não existe uma camada de vórtices associada à linha de máxima intensidade de turbulência. Não obstante, a complexidade do escoamento é evidenciada pela diminuição da altura dos pontos de máxima intensidade de turbulência à medida que aumenta a distância a sotavento.

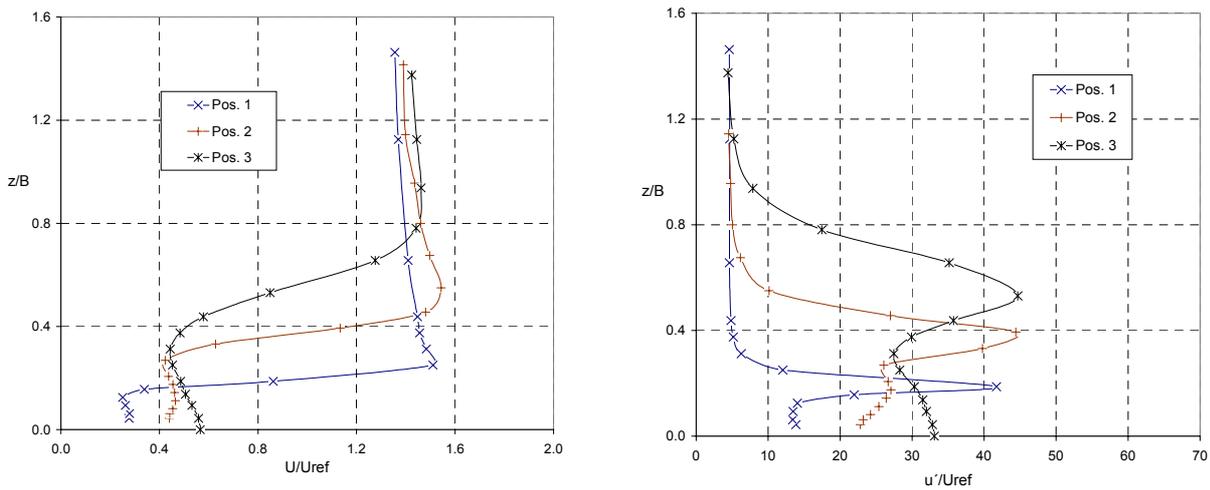


Fig. 6. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção normal).

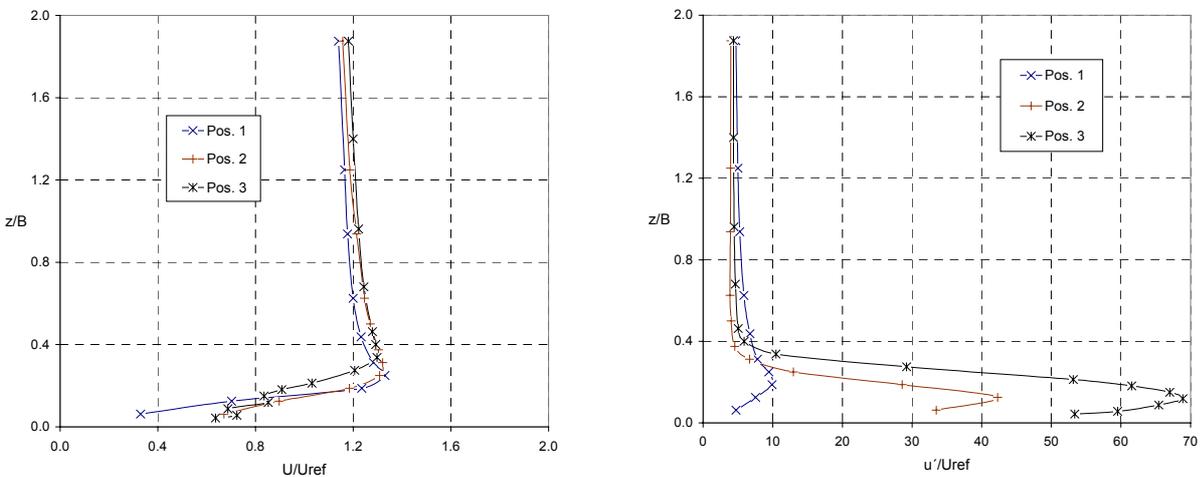


Fig. 7. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção oblíqua).

As amostras de velocidade instantânea utilizadas para obter os valores de velocidade média e intensidade de turbulência têm uma duração de 30 segundos. Na Fig. (9) é mostrado somente 1 segundo de cada registro correspondente ao perfil da posição 2 com direção normal do vento incidente. Não são reproduzidos os registros de todos os pontos de medição que constituem o perfil, mas os correspondentes a  $z/B = 0.27$ ;  $0.33$ ;  $0.39$ ;  $0.55$  e  $1.14$ , ordenados da esquerda para a direita na figura.

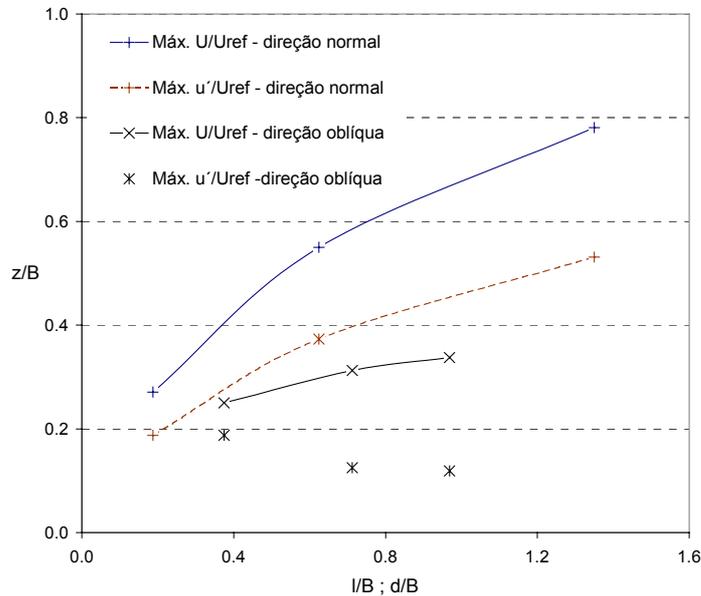


Fig. 8. Linhas de máxima velocidade média e intensidade de turbulência.

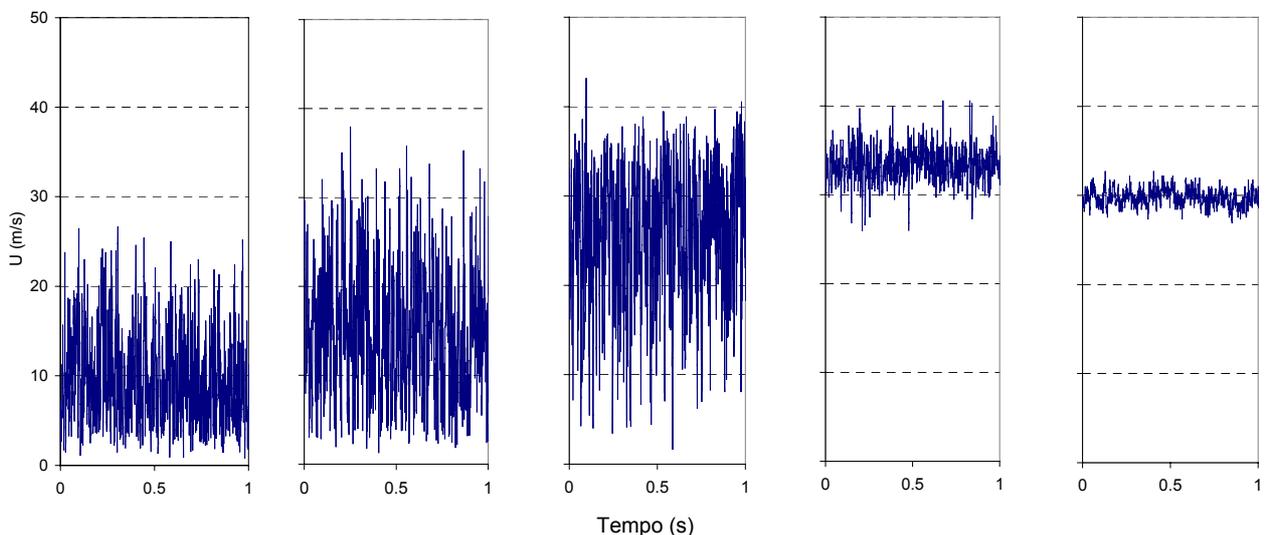


Fig. 9. Registros parciais de velocidade correspondente ao perfil da posição 2 (direção normal).

No ponto de máxima intensidade de turbulência ( $z/B = 0.39$ ) é apreciável a amplitude das flutuações de velocidade. Nos pontos inferiores ( $z/B = 0.27$  e  $0.33$ ), as flutuações também são muito importantes e é possível apreciar uma “saturação” no sinal quando os valores de velocidade se aproximam a zero. Isto é devido a que o anemômetro de fio quente, por seu princípio de funcionamento, não registra valores muito próximos a zero e não detecta mudanças na direção da velocidade instantânea. Desta forma, o recorte (saturação) no sinal indicaria reversões instantâneas de velocidade e, muito possivelmente, recirculação do escoamento médio nos pontos inferiores.

No ponto de máxima velocidade média ( $z/B = 0.55$ ) as flutuações são menores, mas ainda muito importantes. Já no ponto superior ( $z/B = 1.14$ ), as flutuações são pequenas e mostram as características do escoamento incidente. Esta representação gráfica dos registros das flutuações permite apreciar a diferença das características do escoamento nas proximidades ao modelo com relação ao escoamento incidente.

Na Fig. (10) são apresentados os espectros correspondentes às flutuações de velocidade nos pontos  $z/B = 0.39$ , 0.55 e 1.14, devido a que nos pontos inferiores, o recorte do sinal obtido gera distorções no espectro resultante. No ponto de máxima intensidade de turbulência ( $z/B = 0.39$ ) distingue-se um pequeno pico em 33 Hz, provavelmente associado com a frequência predominante da camada de vórtices. O número de Strouhal, obtido a partir de

$$St = \frac{f_d B}{U}, \quad (2)$$

têm um valor de 0.352, para essa frequência predominante  $f_d$ .

Para  $z/B = 0.55$  (ponto de máxima velocidade) não aparece um pico associado a um intervalo de frequências, mas a forma do espectro sugere um deslocamento da energia para os vórtices menores (frequências superiores a 40 Hz).

Com relação à análise do ponto de máxima intensidade de turbulência, em um trabalho anterior (Möller & Wittwer, 1998) foi analisado o desprendimento de vórtices de von Kármán provocado por um cilindro interposto em um escoamento uniforme com números de Reynolds na faixa de 7000 a 20000. Para esses vórtices alternados, os valores do número de Strouhal se mantém entre 0.18 e 0.20, e são similares aos publicados por Blessmann (1990).

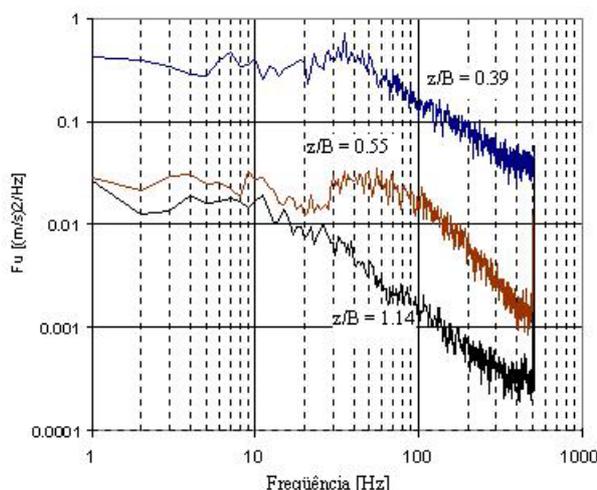


Fig. 10. Espectros das flutuações de velocidade.

#### 4. Conclusões

A análise destes primeiros resultados permite ter informação concreta sobre o comportamento do escoamento de ar na parte superior de construções simples com determinadas proporções geométricas. Devido à importância das características do escoamento turbulento no processo de dispersão, os resultados podem aplicar-se ao projeto de chaminés para determinar sua altura e localização, e desta forma, evitar o ingresso da pluma de dispersão na região do escoamento afetada diretamente pela construção. Neste caso particularmente, permitirá projetar os experimentos destinados a avaliar quantitativamente o processo de dispersão nas distintas situações da pluma com respeito à zona afetada.

A análise das flutuações de velocidade, em primeiro lugar, permite estabelecer com uma boa aproximação, as distintas regiões que caracterizam o escoamento em torno deste tipo de modelos. Por outro lado, a análise espectral permite conhecer alguns detalhes do comportamento do escoamento em zonas de bastante complexidade. Uma análise complementar permitirá estabelecer parâmetros vinculados às frequências predominantes na camada de vórtices.

Finalmente, esta primeira avaliação realizada com o anemômetro de fio quente serve para conhecer vantagens e limitações de sua utilização para este tipo de análise. É muito importante ter o equipamento que permita detectar zonas de recirculação que geralmente afetam a diluição de gases provocando o estancamento e acumulação em certas regiões. Não obstante, é necessário completar o estudo na região situada a sotavento do modelo e examinar algumas modificações geométricas.

#### 5. Referências

- Blessmann, J., 1982, "The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- Blessmann, J., 1990, "Vibrações por desprendimento de vórtices", *Caderno de Engenharia CE-39*. UFRGS, Brasil.
- Cook, N. J., 1990, "The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures", (Building Research Establishment). London, UK.

- Davenport, A. G., Isyumov, N., Field, J.D., 1968, "A wind tunnel evaluation of the U.S. Steel Building heliport", Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario. Engineering Science Research Report, BLWT-1-68.
- Hanna, S. R., 1982, "Turbulent diffusion: Chimneys and cooling towers", Engineering Meteorology, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Loredou Souza, A. M., Camaño Schettini, E. B. ,2002, "Estudo aerodinâmico das características do vento na região dos helipontos do projeto SP Wellness – Alphaville", Relatório Técnico, Laboratório de Aerodinâmicas das Construções – LAC – UFRGS.
- Meroney, R., Leitzl, B., Rafailidis, S., Schatzmann, M., 1999, "Wind-tunnel and numerical modeling of and dispersion about several building shapes", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 333-345.
- Möller, S. V., Wittwer, A. R., 1998, "Evaluación de un sistema anemométrico y su utilización para el análisis de la performance de un túnel de viento y el desprendimiento de vórtices en un canal de aire", Anales del 8° Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Volumen II, pág. 1049, Concepción, Chile, Octubre 1998.
- Wittwer, A. R., Möller, S. V., 2000, "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 84, pp. 307-320.