

# EFEITO DA RAZÃO DE BLOQUEIO SOBRE O NÚMERO DE STROUHAL EM ESCOAMENTOS EM CILINDROS

R. S. Silveira, [rodrigo.santiago@ufrgs.br](mailto:rodrigo.santiago@ufrgs.br)

S. V. Möller, [svmoller@ufrgs.br](mailto:svmoller@ufrgs.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Rua Sarmento Leite, 425  
90050-170 Porto Alegre, RS, Brasil

**Resumo.** O número de Strouhal nos fornece a frequência de desprendimento de vórtices associada a corpos expostos a um escoamento em um canal aerodinâmico, dependendo do formato do corpo. Investiga-se neste artigo, as relações do número de Strouhal com fatores geométricos do canal, em particular, da razão de bloqueio, seus efeitos sobre eles em escoamentos em cilindros, onde são testados cilindros de diversos diâmetros dentro de uma faixa de valores que possam acarretar tais efeitos. Para a determinação do número de Strouhal utilizamos a frequência de desprendimento de vórtices obtidas através da função de densidade autoespectral, com a utilização de anemometria de fio quente para sua medição. Para a observação dos efeitos da razão de bloqueio, medições foram realizadas para diferentes velocidades, para uma faixa de número de Reynolds entre  $10^3$  e  $10^4$ , assim como a utilização de transformada de ondaletas para tratamento mais amplo dos resultados das séries temporais obtidas do experimento.

**Palavras-chave:** escoamento turbulento, anemometria de fio quente, Número de Strouhal, bloqueio, ondaletas.

## 1. INTRODUÇÃO

Fenômenos que ocorrem em escoamentos em torno de um cilindro circular fazem parte de um grande grupo de aplicações em engenharia, como a utilização de chaminés, navios rotores e tubos verticais em geral. Estudar o comportamento de tais fenômenos tem influência direta na elaboração dos projetos de construção, principalmente no que se diz respeito ao comportamento dos vórtices e a interação fluido-estrutura.

Um dos parâmetros mais usados na análise de escoamento em cilindros circulares isolados é a frequência adimensional associada a desprendimento de vórtices, que é o número de Strouhal ( $S$ ), que é definido por

$$S = \frac{f_s D}{U} \quad (1)$$

onde  $f_s$  é a frequência de desprendimento de vórtices,  $D$  o diâmetro do tubo e  $U$  a velocidade não da corrente livre (Blevins, 1990).

Normalmente, estuda-se o número de Strouhal em função do número de Reynolds, que numa certa faixa é função. O número de Strouhal é considerado constante para cada formato de corpo exposto ao escoamento numa certa faixa e a frequência de desprendimento de vórtices é obtida a partir do espectro de turbulência que utiliza Transformada de Fourier para sua confecção. Entretanto, fatores geométricos associados ao formato do canal aerodinâmico ou do túnel de vento, podem apresentar influências sobre o número de Strouhal, tal como razão de bloqueio que é a razão entre o comprimento característico do corpo em análise e o comprimento associado a seção de teste.

Este trabalho investiga os efeitos que a razão de bloqueio sobre o número de Strouhal, onde cilindros com diâmetros variados foram avaliados. West & Apelt (1982) realizaram um estudo que envolve este assunto, onde a razão de bloqueio entre 6 e 16%, numa faixa de número de Reynolds que varia entre  $10^4$  e  $10^5$ , pode causar variações no número de Strouhal.

Estudos recentes (Indrusiak, 2004) ainda revelam também alterações da frequência de desprendimento de vórtices, em termos de valor médio, com o tempo, fazendo com que uma análise de escoamentos estacionários e transientes seja também necessária para avaliar seus efeitos.

## 2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um canal aerodinâmico que possui uma seção de testes retangular com dimensões internas de 193 mm de largura ( $L$ ) por 146 mm de altura ( $H$ ) e é representado na Figura 1. Um ventilador centrífugo de potência 0,75 kW injeta ar, passando por um difusor e em seguida por homogeneizadores de fluxo do tipo grade, colméia e tela, fazendo com que se reduza a uma intensidade de turbulência no canal de 1%.

Para se medir a velocidade de referência, é utilizado um tubo de Pitot fixado antes da seção de testes. A velocidade é controlada e pode variar neste canal aerodinâmico de 0 a 15 m/s em virtude da utilização de um inversor de frequência. Foram escolhidas as velocidades de 5, 10 e 15 m/s para a análise em estudo.

Para a medição das flutuações de velocidade do escoamento é utilizada a técnica de anemometria de fio quente a temperatura constante, com o uso do equipamento DANTEC *StreamLine*. Uma sonda simples de fio reto é posicionada, conforme mostra a Figura 1, onde a distância  $x$  da sonda ao cilindro é variável de acordo com diâmetro do tubo analisado. A aquisição de dados é feita por intermédio de uma placa conversora analógico/digital (A/D), modelo NATIONAL INSTRUMENTS 9215, conectada com interface USB e controlada por um computador pessoal. O software utilizado para ajuste e configuração dos parâmetros da sonda e também para a aquisição de dados é o *StreamWare*, versão 3.4, também da DANTEC.

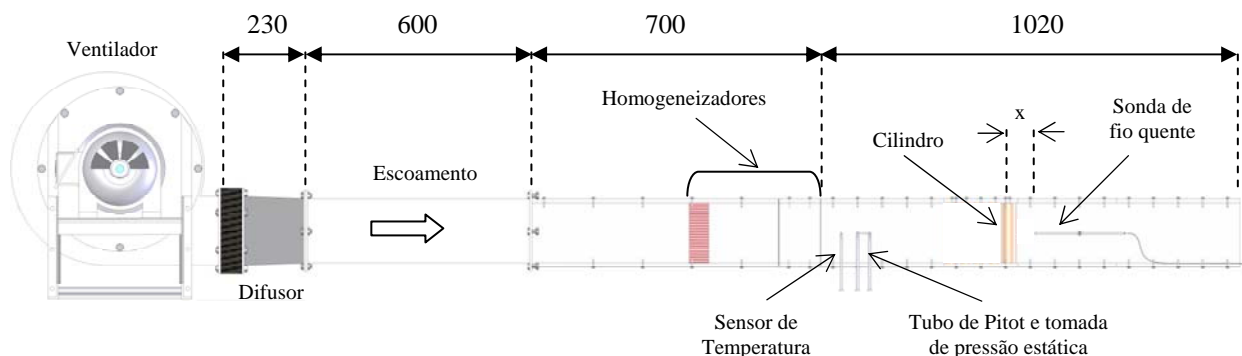


Figura 1. Vista lateral do canal aerodinâmico (medidas em mm).

São estudados sete cilindros de PVC rígidos cujos diâmetros ( $D$ ) estão representados na Tabela 1. O objetivo deste trabalho é analisar quais são os efeitos da razão de bloqueio sobre o número de Strouhal, logo esta característica, juntamente com a razão de aspecto, de cada cilindro também é apresentada na Tabela 1.

Diâmetro do Tubo (mm)	Razão de Bloqueio (D/L)	Razão de Aspecto (H/D)
2,4	1,24%	60,83
9,5	4,92%	15,37
16	8,29%	9,13
25	12,95%	5,84
32	16,58%	4,56
40	20,73%	3,65
50	25,91%	2,92
60	31,09%	2,43

Tabela 1. Características dos tubos analisados.

### 3. FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

#### 3.1. Análise de Fourier

Para se fazer o tratamento dos dados das séries temporais faz-se uso da transformada de Fourier e do espectro de Fourier, com o objetivo de se obter uma análise no domínio da frequência. É utilizada a função densidade de espectral de potência, que de acordo com Bendat e Piersol (1971), destaca as principais características dos sinais adquiridos, consistindo no espectro de Fourier de uma série, suavizado sobre todos os intervalos de frequência e sobre conjuntos de estimativas.

#### 3.2. Análise de Ondaletas

A análise de ondaletas consiste no uso de funções chamadas de ondaletas (*wavelets*), que possuem energia finita e média zero. A base é gerada por meio de dilatações e translações de uma única ondaleta e é dada por

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in \mathbb{R}, a > 0 \quad (2)$$

onde  $a$  é escala e  $b$  é a posição da ondaleta.

A transformada contínua de ondaletas de uma função  $x(t)$  é dada por:

$$\tilde{X}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (3)$$

O respectivo espectro de ondaletas é uma matriz quadrada dos coeficientes de ondaletas.

Em um espectro de ondaletas a distribuição de energia do sinal transiente é associado a cada tempo e escala (ou frequência). Essa representação é também chamada de espectrograma.

Os estudos foram feitos e analisados com a utilização do software Matlab, versão 5.3, e seus pacotes de ferramentas para análise de sinais, tratamento estatístico e ondaletas.

#### 4. RESULTADOS

A Tabela 2 mostra os valores obtidos para a frequência de desprendimento dos vórtices, do número de Strouhal e do número de Reynolds associados aos tubos estudados e sua respectiva razão de bloqueio.

Diâmetro do Cilindro (mm)	Velocidade de Referência (m/s)	Número de Reynolds	Frequência de Desprendimento de Vórtices (Hz)	Razão de Bloqueio	Número de Strouhal
9,5	4,86	2996	99,6	4,92 %	0,195
	10,14	6170	222,7		0,209
	14,87	8910	333,9		0,213
16	4,85	4986	61,5	8,29 %	0,203
	10,14	10359	128,9		0,203
	14,88	15058	199,2		0,214
25	4,83	7719	41	12,95%	0,213
	10,10	16069	87,9		0,218
	14,76	23250	128,9		0,218
32	4,82	9874	35,2	16,58 %	0,233
	10,08	20553	70,3		0,223
	14,81	29941	105,5		0,228
40	4,78	12415	29,3	20,73%	0,245
	9,99	25827	58,6		0,235
	14,65	37578	82		0,224
50	4,76	15495	23,4	25,91%	0,246
	9,95	32182	46,9		0,236
	14,53	46637	70,3		0,242
60	4,72	18365	19,5	31,09%	0,248
	9,87	38312	41		0,249
	14,46	55693	60,6		0,251

Tabela 2. Dados de velocidade, número de Reynolds, frequência de desprendimento de vórtices, razão de bloqueio e número de Strouhal

Esses dados já nos mostram a tendência do aumento do número de Strouhal com a razão de bloqueio. Essa constatação é mais clara na Figura 2, para cada velocidade de referência. As velocidades escolhidas foram valores próximos de 5, 10 e 15 m/s. As velocidades foram medidas antes de cada cilindro, conforme Figura 1. A faixa do número de Reynolds está entre  $10^3$  e  $10^4$ . O cilindro de diâmetro 9,5 mm apresentou, para os três valores de velocidade estabelecidos, apresentou pequenas flutuações do número de Strouhal padrão para um cilindro, que é de 0,21, escolhido como referência para comparação. As variações mais evidentes ficam mais visíveis a partir da utilização dos cilindros de 32 mm.

A Figura 2 também mostra a concordância com Roshko (1954) em que o número de Strouhal decresce para baixo número de Reynolds e razões de bloqueios baixas.

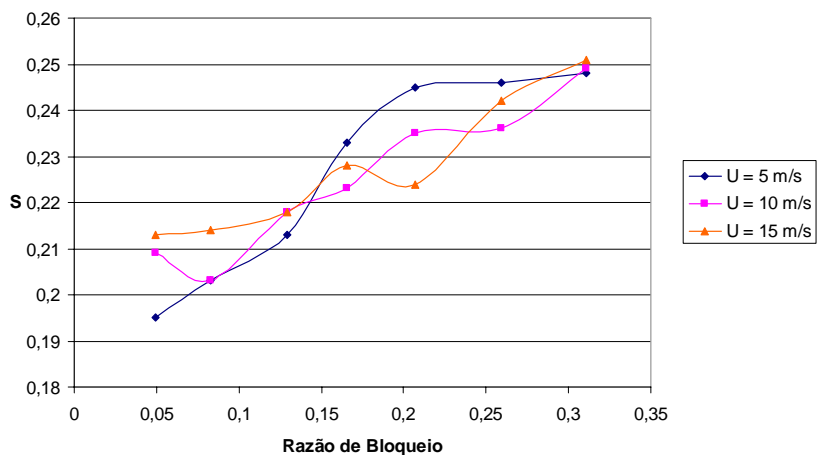


Figura 2. Gráfico do Número de Strouhal em Função da Razão de Bloqueio para as velocidades de referência de 5, 10 e 15 m/s

As Figuras 3 (a), 3 (b), 3 (c) e 3 (d) apresentam os espectros de turbulência (espectros de Fourier) para os cilindros de 9,5 mm, 32 mm, 50 mm e 60 mm, para a velocidade de referência da ordem de 15 m/s, cujas frequência de desprendimento de vórtices são 333,9 Hz, 105,5 Hz, 70,3 Hz e 60,6 Hz. O número de Strouhal atingiu os valores de 0,213, 0,228, 0,242 e 0,251, respectivamente.

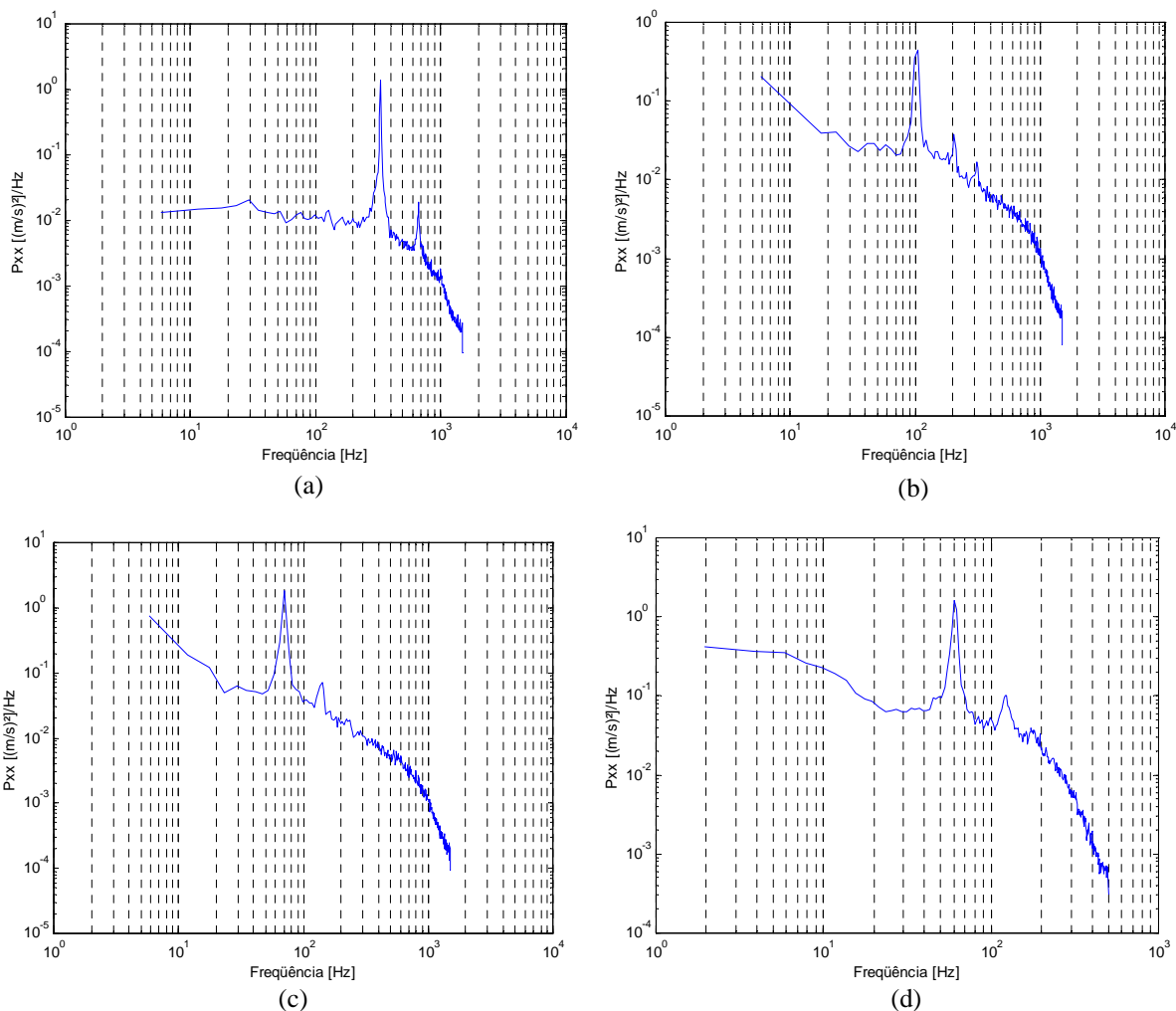


Figura 3. Espectro de Fourier para: (a) cilindro de 9,5 mm e  $Re = 8,910 \times 10^3$ , (b) cilindro de 32 mm e  $Re = 2,9941 \times 10^4$ , (c) cilindro de 50 mm e  $Re = 4,6637 \times 10^4$  e (d) cilindro de 60 mm e  $Re = 5,5693 \times 10^4$ .

Os espectrogramas de ondaletas foram calculados utilizando a transformada contínua de ondaletas e são analisados o comportamento das frequência de desprendimento de vórtices ao longo do tempo. A Figura 4 (a), 4 (b), 4 (c) e 4 (d) mostram um gráfico plano da frequência em função do tempo para mesmos espectros de turbulência da Figura 3. Nesta representação pode-se ver o comportamento da frequência com o tempo, assim como a faixa de maior energia onde se encontra a frequência de desprendimento de vórtices, num sinal transiente, para diferentes faixas de energia de acordo com os cilindros.

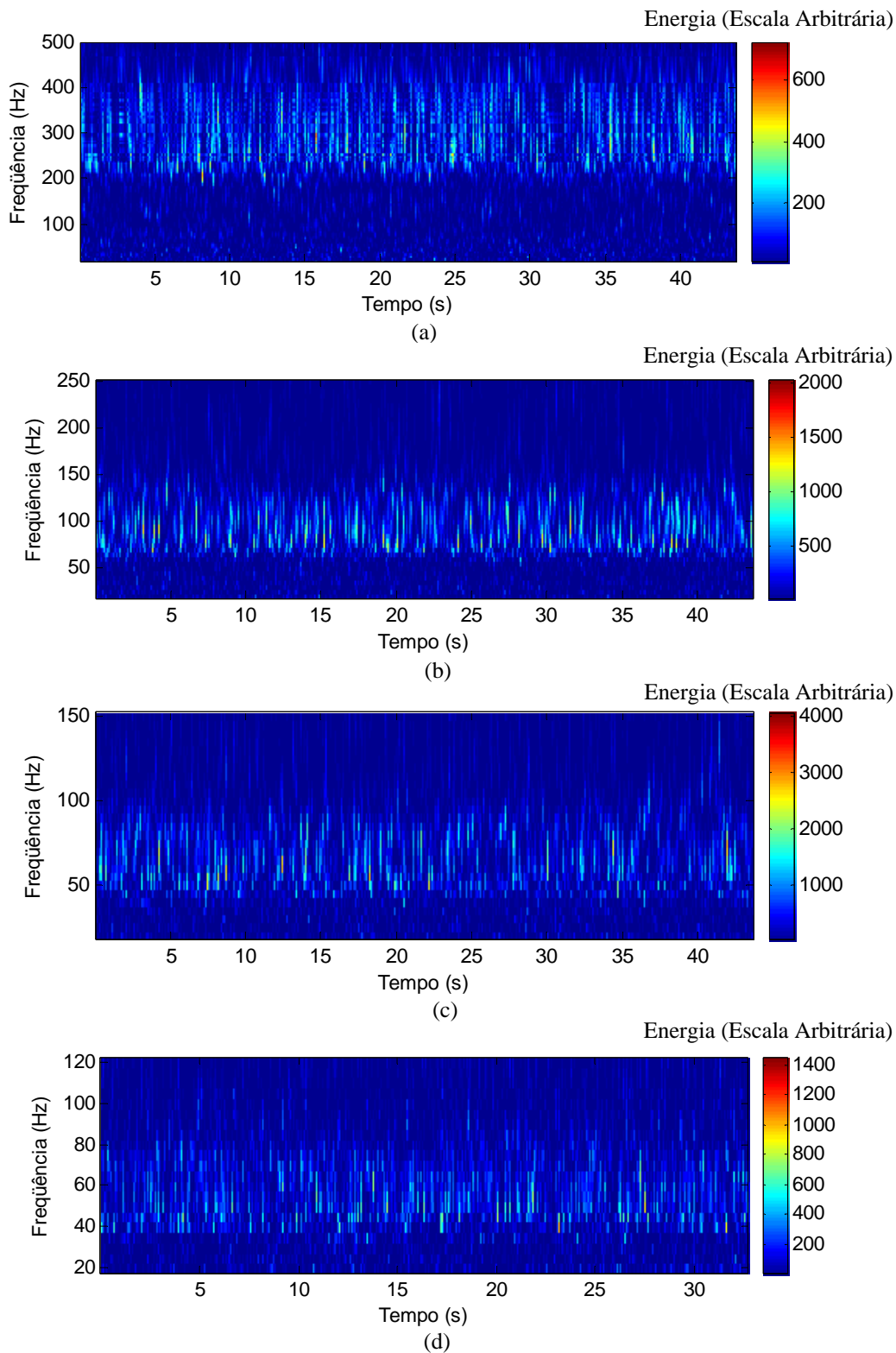


Figura 4. Espectro de ondaletas para a esteira de vórtices para: (a) o cilindro de 9,5 mm (4,92% de bloqueio), (b) o cilindro de 32 mm (16,58% de bloqueio), (c) o cilindro de 50 mm (25,91% de bloqueio) e (d) o cilindro de 60 mm (31,09 % de bloqueio).

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo estudou-se o comportamento do número de Strouhal diante de efeitos de fatores geométrico como a razão de bloqueio. Pode-se observar que para números de Reynolds mais baixos, o número de Strouhal diminuiu à exceção de razões de bloqueios mais altas. Com o aumento do número de Reynolds do escoamento, numa certa faixa se obteve uma estabilidade no valor do número de Strouhal, a menos, novamente, da influência da razão de bloqueio.

As variações mais abruptas do número de Strouhal, de acordo com o observado, podem ocorrer para razões de bloqueio altas, velocidades maiores, no caso deste trabalho, de 15 m/s e, por consequência, para números de Reynolds mais altos, dentro da faixa analisada de  $10^3$  e  $10^4$ .

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPQ, a CAPES e ao Ministério da Educação pelo suporte dado para o desenvolvimento do trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Bendat, J. S. & Piersol, A. G., 1971, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley – Interscience, New York.
- Blevins, R. D., 1990, “Flow-Induced Vibration”, 2ª. Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, 452 p.
- Indrusiak, M. L. S., 2004, “Caracterização de Escoamentos Turbulentos Transientes Usando a Transformada de Ondaletas”, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Olinto, C. R., Indrusiak, M. L. S., Möller, S. V., 2005, “Strouhal Number Fluctuations in a Cylinder Wake”, *International Congress of Mechanical Engineering*, 6-11 November, Ouro Preto.
- Roshko, A., 1954, “On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets”, *National Advisory Committee for Aeronautics*, R. 1191, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- West, G. S. & Apelt, C. J., “The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between  $10^4$  and  $10^5$ ”, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 114, pp. 361-377.
- Zdravkovich, M. M., 1997, “Flow Around Circular Cylinders”, Vol. 1-2, Oxford University Press Inc., New York. 1264 p.

## EFFECT OF BLOCKAGE RATIO ON STROUHAL NUMBER IN A CIRCULAR CYLINDER WAKE

R. S. Silveira, [rodrigo.santiago@ufrgs.br](mailto:rodrigo.santiago@ufrgs.br)

S. V. Möller, [svmoller@ufrgs.br](mailto:svmoller@ufrgs.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Rua Sarmento Leite, 425  
90050-170 Porto Alegre, RS, Brasil

**Abstract.** *The Strouhal number gives us the frequency of vortex shedding associated with bodies exposed to a flow in a aerodynamic channel, depending on the format of the body. This article investigates the relationship of the Strouhal number with geometric factors of the channel, in particular, the ratio of blocking its effects on them in flows in cylinders, which are tested cylinders of different diameters within a range of values that can cause such effects. To determine the Strouhal number we use the vortex shedding frequency obtained through the density function autoespectral with the use of hot wire anemometry for measurement. For observing the effects of the ratio of block, measurements were performed for different speeds, for a range of Reynolds number between  $10^3$  and  $10^4$  as well as the use of wavelet transform for broader treatment of the results of time series obtained from the experiment.*

**Keywords:** *turbulent flow, hot-wire anemometry, Strouhal Number, blockage, wavelets.*