

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS RETANGULARES: INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE FORMA

Cláudio Lindquist – lindquis@dem.feis.uneps.br

Odenir de Almeida – odenir@dem.feis.unesp.br

Sérgio Said Mansur – mansur@dem.feis.unesp.br

UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
15385-000 – Ilha Solteira, SP, Brasil

Aristeu da Silveira Neto - aristeus@mecanica.ufu.br

UFU – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica
38400-902 – Uberlândia, MG, Brasil

***Resumo.** Este trabalho apresenta uma investigação numérica e experimental da influência da razão de forma sobre o escoamento ao redor de cilindros de base retangular, para números de Reynolds inferiores a 300. A razão de forma, definida como a relação entre os lados da seção transversal do cilindro, foi variada entre 1 e 16. Os ensaios experimentais foram conduzidos num túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo contínuo. A frequência de emissão dos vórtices na esteira do cilindro foi determinada utilizando-se a anemometria de filme quente. Imagens da esteira do cilindro e do escoamento sobre as superfícies laterais foram obtidas com o auxílio de técnicas de visualização de escoamentos. As simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do código computacional FLUENT®5.0, utilizando-se o esquema de transporte convectivo QUICK e o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. As simulações foram efetuadas sem o uso de modelos de turbulência. Os resultados obtidos numérica e experimentalmente, além de concordarem entre si, encontram-se em bom acordo com dados da literatura.*

***Palavras-chave:** Cilindro retangular, razão de forma, esteira de von Kármán, simulação numérica, túnel hidrodinâmico.*

1. INTRODUÇÃO

O escoamento em torno corpos cilíndricos constitui um assunto de grande interesse científico, com ampla aplicação em problemas de engenharia. Escoamentos desta natureza são frequentemente encontrados no interior de caldeiras, trocadores de calor, medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex meters*) e vários outros tipos de equipamentos industriais, bem como ao redor de estruturas expostas à ação do vento natural e de correntes fluviais ou marítimas.

Do ponto de vista da dinâmica dos fluidos, o problema caracteriza-se pela presença de fenômenos altamente complexos, que envolvem a separação e o recolamento de camadas cisalhantes, a geração e o transporte de vórtices nas imediações da superfície sólida e, ainda, a

formação de uma esteira turbilhonar a jusante do cilindro. Uma compreensão mais detalhada destes fenômenos mostra-se de fundamental importância na definição de critérios explícitos de projeto, dimensionamento e previsão de falhas operacionais em diferentes tipos sistemas fluidomecânicos.

Ao longo das últimas décadas, um grande esforço de pesquisa tem sido realizado nesta área, com particular destaque para estudos envolvendo cilindros de seção transversal circular. Ainda que não possam ser considerados raros, trabalhos que tratem do escoamento ao redor de corpos de base retangular são nitidamente mais escassos na literatura. Neste caso, a presença das arestas modifica substancialmente a estrutura do escoamento que é fortemente influenciada pelas proporções geométricas da seção retangular, definida pela razão de forma do cilindro:

$$\phi = \frac{A}{B} \quad (1)$$

que representa a relação entre a altura A e a base B da seção transversal retangular.

O número de Reynolds do escoamento pode ser definido como:

$$Re_B = \frac{U_\infty B}{\nu} \quad (2)$$

onde U_∞ é velocidade da corrente livre não perturbada e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Para números de Reynolds acima de um determinado valor crítico, vórtices são emitidos alternadamente de ambos os lados do corpo, e são convectados ao longo da esteira que se forma a jusante do cilindro. A frequência de emissão dos vórtices f é dada, na forma adimensional, pelo número de Strouhal, dado por:

$$St_A = \frac{f A}{U_\infty} \quad (3)$$

A rigor, qualquer dimensão do cilindro poderia ser utilizada como dimensão característica. Entretanto, é sempre interessante que a escolha não seja completamente arbitrária, mas tente ser representativa da física do problema. Desta forma, a dimensão A da altura da seção retangular é freqüentemente utilizada para esta finalidade.

Okajima (1982) empreendeu uma investigação numérica e experimental sobre o escoamento ao redor de cilindros com seção transversal retangular, determinando a distribuição de velocidades, a configuração do escoamento em torno do obstáculo e, ainda, o comportamento do número de Strouhal, em função do número de Reynolds. Os resultados obtidos pelo autor mostraram que, para cilindros com razão de forma compreendida entre 2 e 3, observa-se a existência de uma faixa crítica do número de Reynolds, dentro da qual o padrão do escoamento modifica-se repentinamente. Este fenômeno produz uma alteração brusca na frequência de emissão dos vórtices, que se manifesta por uma descontinuidade na curva Strouhal vs Reynolds.

Numa investigação mais recente, Ohya *et al.* (1992) realizaram um estudo numérico, baseado no método de diferenças finitas, sobre o escoamento ao redor de cilindros retangulares, com razão de forma variando entre 3 e 9, para Reynolds igual a 10^3 . Este trabalho fornece importantes informações sobre o fenômeno de geração de vórtices ao longo das superfícies laterais do cilindro, possibilitando identificar alguns dos mecanismos que dão origem às instabilidades da camada cisalhante ao longo do obstáculo.

Ampliando os resultados de Ohya *et al.* (1992), Nakamura *et al.* (1996) conduziram uma investigação numérica e experimental, utilizando cilindros com razão de forma compreendida entre 3 e 16, para números de Reynolds situados na faixa de 200 a 10^3 . Os resultados obtidos permitem observar que, para determinados regimes de escoamento, a curva de Strouhal, traçada em função da razão de forma do corpo, evolui na forma de patamares bem definidos.

No presente trabalho, os fenômenos acima descritos são, também, investigados, numérica e experimentalmente, para cilindros retangulares com razão de forma entre 1 e 16, para números de Reynolds abaixo de 10^3 , reforçando as constatações de Nakamura *et al.* (1996). Visualizações do escoamento são, também, apresentadas, auxiliando na identificação e interpretação dos mecanismos responsáveis pela alteração no modo de emissão dos vórtices.

2. MODELAGEM NUMÉRICA

De maneira geral, o escoamento transiente, incompressível e adiabático, de um fluido Newtoniano, ao redor de corpos cilíndricos pode ser bem representado pela solução numérica das equações de Navier-Stokes, associada à conservação da massa. No presente artigo, estas equações foram resolvidas com o auxílio do código computacional FLUENT® 5.0, considerando-se, adicionalmente, o escoamento bidimensional e as propriedades físicas do fluido constantes. Neste programa, as equações do movimento são discretizadas no espaço pelo método dos volumes finitos. Diferentes opções para o acoplamento pressão-velocidade e para o tratamento dos termos convectivos, encontram-se disponíveis para o usuário. Neste trabalho, em particular, empregou-se o algoritmo SIMPLEC, desenvolvido por Patankar & Spalding (1972), juntamente com o esquema QUICK, proposto por Leonard (1979). Nenhum modelo explícito de turbulência foi utilizado, em virtude dos números de Reynolds pouco elevados que caracterizam os escoamentos tratados aqui.

A Figura 1 ilustra, de maneira genérica, o domínio computacional utilizado, constituído por malhas retangulares e não-uniformes, mais refinadas nas proximidades das paredes laterais do corpo sólido e a jusante dele. Para melhor representar as características do escoamento ao redor do cilindro, cinco diferentes domínios de cálculo foram utilizados, em função das proporções geométricas do obstáculo, como mostra a Tabela 1.

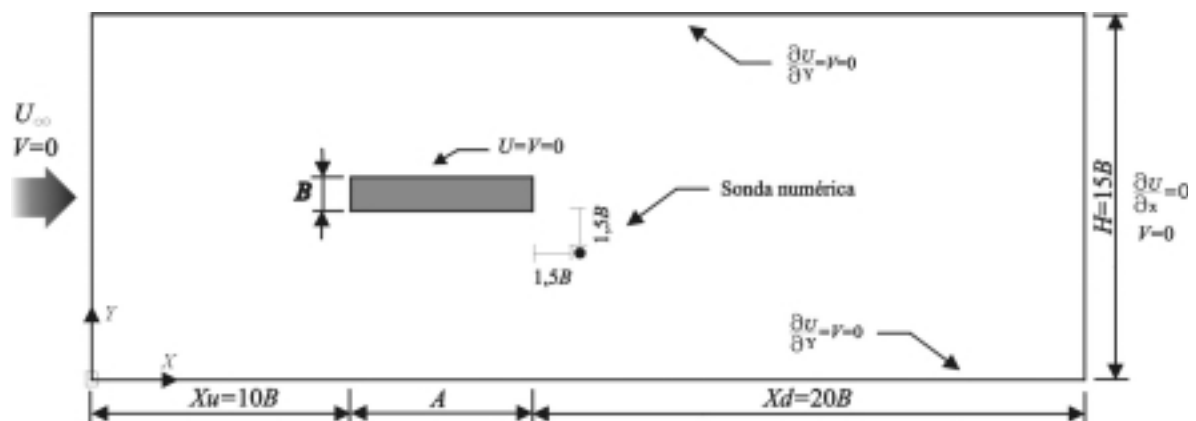


Figura 1 – Ilustração esquemática do domínio computacional e condições de contorno.

Em todas as simulações, as seguintes condições de contorno foram empregadas: perfil de velocidades uniforme na entrada do domínio, com $U = 1$ e $V = 0$; condição do tipo von Neumann na seção de saída, ou seja, escoamento completamente desenvolvido; condição de simetria nas fronteiras superior e inferior, $V = \partial U / \partial y = 0$. Considerou-se, adicionalmente, que as paredes do cilindro sejam impermeáveis e não permitam deslizamento do fluido,

implicando em $U = V = 0$.

Um esquema de discretização temporal completamente implícito foi, ainda, empregado, ajustando-se o passo de tempo em torno de 0,02, onde τ relaciona-se com o tempo real t , através da expressão:

$$\tau = t \cdot U_{\infty} / B \quad (4)$$

Os cálculos foram iniciados e conduzidos até a obtenção de um regime estatisticamente estabelecido, caracterizado por uma variação periódica das propriedades médias do escoamento na esteira do cilindro.

Tabela 1 – Configuração dos domínios de cálculo.

Domínio	$\phi = A/B$	Malha
1	5	250 × 90
2	7	270 × 90
3	9	290 × 90
4	10	300 × 90
5	11	310 × 90

Na posição ilustrada Figura 1, foi inserida uma sonda numérica a jusante do obstáculo, programada para registrar a série temporal da componente vertical da velocidade. A aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) ao sinal adquirido permite obter a frequência de emissão dos vórtices, necessária à determinação do número de Strouhal.

3. INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados em regime de fluxo contínuo, utilizando-se um túnel hidrodinâmico vertical com seção de testes medindo 146×146×500 mm, ilustrado esquematicamente na Figura 2 e descrito com mais detalhes por Lindquist *et al* (1999).

Oito modelos cilíndricos, com razão de forma $\phi = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12$ e 16 , foram confeccionados em aço inox, com acabamento superficial polido. Estes modelos foram usinados com a mesma dimensão nominal da base, qual seja $B = 3$ mm, a fim de manter constante a razão de bloqueio do escoamento, fixada em 2,5%. Desta forma, a dimensão nominal da altura A da seção transversal do corpo sólido varia de 3 mm, para $\phi = 1$, até 48 mm, para $\phi = 16$.

Dois metodologias experimentais distintas foram empregadas para fornecer informações quantitativas e qualitativas sobre o escoamento investigado. A frequência de emissão dos vórtices foi determinada a partir da análise espectral do sinal de velocidade, obtido com o auxílio de um anemômetro Dantec, modelo StreamLine 90N10, equipado com uma sonda de filme quente 55R11.

Para subsidiar a interpretação dos resultados oriundos dos ensaios anemométricos, foram realizadas visualizações do escoamento através da técnica de injeção de corantes líquidos, em sua modalidade *dye wash*. O método consiste, basicamente, na injeção de uma quantidade excessiva de traçador líquido a montante do obstáculo, feita por intermédio de uma agulha retrátil convenientemente posicionada. Em seguida, a injeção de corante é interrompida, e a agulha é rapidamente removida. O corante é, então, convectado pelo escoamento principal,

permanecendo retido apenas nas regiões de velocidade mais baixa, permitindo observar nitidamente a esteira turbilhonar e até mesmo alguns detalhes do escoamento sobre as paredes do cilindro. As imagens assim geradas foram registradas em filme fotográfico ISO 100, utilizando-se uma câmara fotográfica Nikon F4s, munida de uma objetiva Nikkor Micro 60mm.

A velocidade de aproximação da corrente livre U_∞ foi determinada com base na medição da vazão, efetuada por intermédio de um medidor de vazão eletromagnético, assumindo-se um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes.

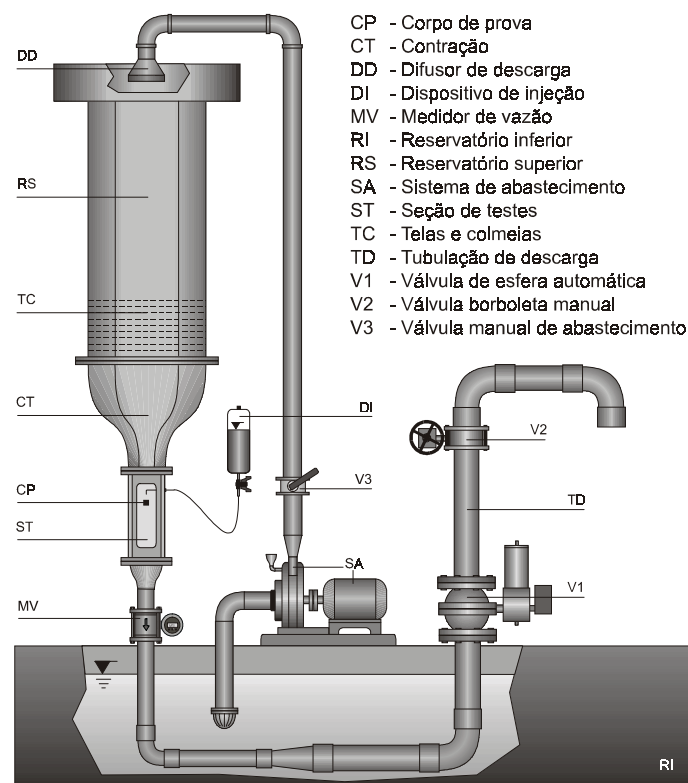


Figura 2 – Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A influência da razão de forma de um cilindro retangular sobre o fenômeno da emissão de vórtices, mantendo-se constante o número de Reynolds, é representada nas Figuras 3 e 4. Para possibilitar a comparação dos resultados com dados da literatura, o número de Strouhal foi calculado com base na dimensão A da seção transversal do cilindro, enquanto que o número de Reynolds apoia-se na dimensão B . Em ambos os gráficos, as linhas pontilhadas foram acrescentadas apenas para realçar a tendência dos pontos experimentais. Os resultados obtidos, quando comparados com os dados de Nakamura *et al.* (1996), apresentam uma concordância bastante satisfatória.

A Figura 3 permite verificar que, para $Re_B = 200$, o número de Strouhal cresce de forma monotônica, em toda a faixa de razão de forma investigada ($\phi = 1$ a 16). Com o aumento do número de Reynolds, a curva de Strouhal começa a apresentar algumas discontinuidades, que se tornam cada vez mais pronunciadas, à medida em que se assevera o regime de escoamento. Esta situação pode ser nitidamente observada na Figura 4, que apresenta resultados numéricos e experimentais obtidos para $Re_B = 300$. Neste caso, a curva de Strouhal possui o aspecto de uma escada, com quatro degraus praticamente horizontais.

Do ponto de vista físico, a origem destas discontinuidades resultam, fundamentalmente, de uma alteração no modo de emissão dos vórtices, conforme relatado por Nakamura *et al.* (1996) e Ohya *et al.* (1992), dentre outros. Para números de Reynolds da ordem de 200, a esteira de um cilindro retangular assume a clássica configuração de von Kármán, freqüentemente encontrada a jusante de cilindros de base circular e quadrada. As duas camadas cisalhantes, que se desenvolvem sobre as paredes do obstáculo, interagem entre si a jusante do corpo sólido, dando origem à formação de vórtices alternados e contra-rotativos, que se propagam ao longo da esteira turbilhonar. Simulações numéricas realizadas por Nakayama *et al.* (1993), nesta mesma condição, confirmam a presença de duas bolhas de recirculação estacionárias, uma sobre cada face lateral do cilindro. Neste caso, apenas a esteira a jusante do obstáculo apresenta um comportamento periódico.

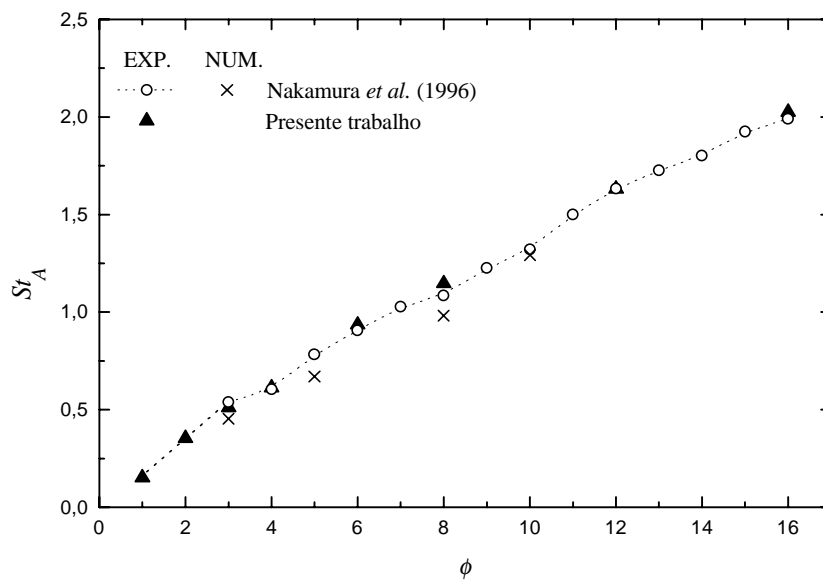


Figura 3 – Comportamento da curva de Strouhal em função da razão de forma ($Re_B = 200$).

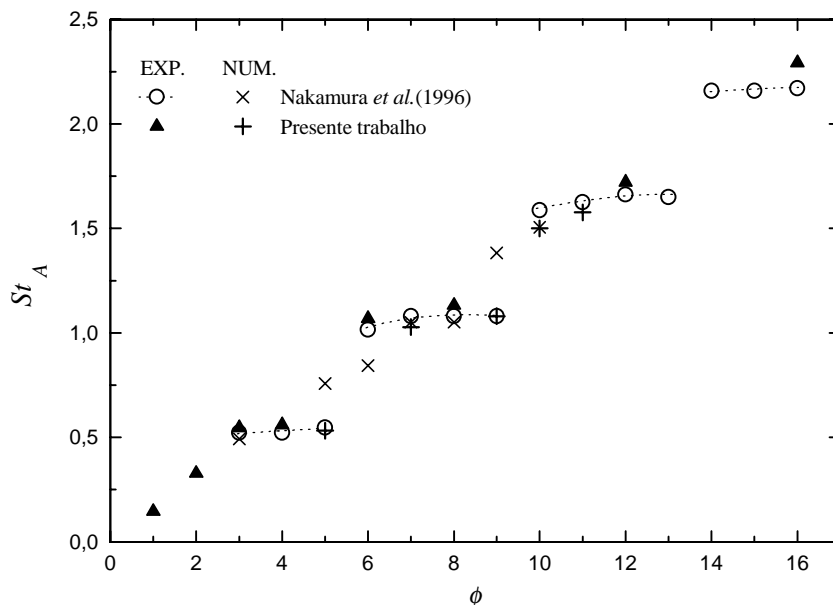


Figura 4 – Comportamento da curva de Strouhal em função da razão de forma ($Re_B = 300$).

Já para números de Reynolds superiores a aproximadamente 250, os vórtices emitidos por cilindros com seção transversal retangular alongada são caracterizados por um outro tipo de

instabilidade do escoamento, conhecida como *Impinging Shear Layer Instability* (ISLI), quando uma única camada cisalhante separada pode tornar-se instável na presença de um canto vivo na borda de fuga do corpo cilíndrico, como descrito por Ohya *et al.* (1992). Neste caso, as bolhas de recirculação que se formam sobre as superfícies laterais do cilindro tornam-se instáveis, oscilando em comprimento e emitindo vórtices discretos alternados, que são convectados ao longo das superfícies laterais do cilindro retangular, para, então, serem lançados, já completamente formados, na esteira que se forma a jusante.

A Figura 5 apresenta imagens do escoamento ao redor de cilindros com razão de forma variando entre 1 e 4, obtidas para $Re_B = 300$, permitindo identificar as mudanças ocorridas no padrão de emissão de vórtices, em função da forma geométrica do obstáculo. Nas Figuras 5(a) e 5(b), referentes aos cilindros com $\phi < 3$, observa-se que o escoamento se descola nas arestas de ataque do cilindro e não volta a se recolocar sobre as suas superfícies laterais. Aqui, a interação entre as duas camadas cisalhantes a jusante do cilindro dá origem à esteira turbilhonar de von Kármán, caracterizada pela presença de instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz.

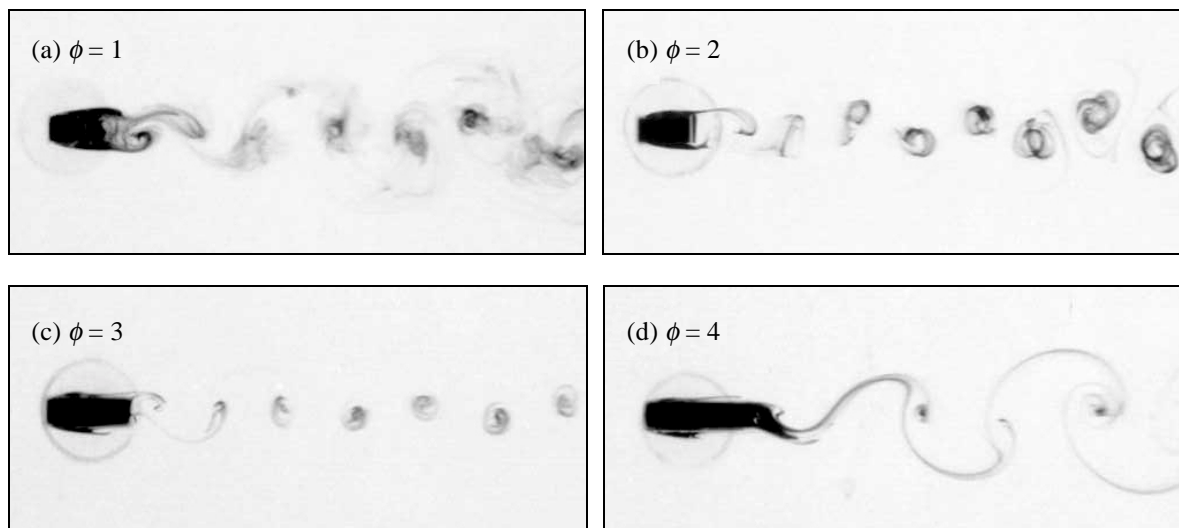


Figura 5 – Visualização do escoamento ao redor de cilindros retangulares ($Re_B = 300$).

Já para os cilindros retangulares com $\phi \geq 3$, Figuras 5(c) e 5(d) observa-se que, após o descolamento das camadas cisalhantes sobre as arestas de ataque do cilindro, uma bolha de recirculação é formada sobre cada uma das suas superfícies laterais do cilindro. Estas bolhas, instáveis e oscilantes, fragmentam-se e dão origem a pequenos vórtices, que são transportados ao longo das superfícies laterais do cilindro e, finalmente, emitidos na esteira que se forma a jusante do cilindro.

A Figura 6 apresenta visualizações das camadas cisalhantes para cilindros com razão de forma $\phi = 4, 8, 12$ e 16 . É interessante observar que existe uma correlação entre o número de vórtices presentes simultaneamente sobre uma das superfícies laterais do cilindro e os "degraus" que caracterizam a curva Strouhal vs Razão de forma na Figura 4. Pode-se verificar, facilmente, que o número de Strouhal satisfaz a relação:

$$St \cong 0,6 n \quad (4)$$

onde n é um número inteiro, que representa a quantidade de vórtices sobre uma das faces laterais do cilindro retangular. De fato, $n = 1$ para os cilindros com $\phi = 3$ a 5 , $n = 2$ para $\phi = 6$ a 9 ; $n = 3$ para $\phi = 10$ a 13 , e $n = 4$, para $\phi = 14$ a 16 .

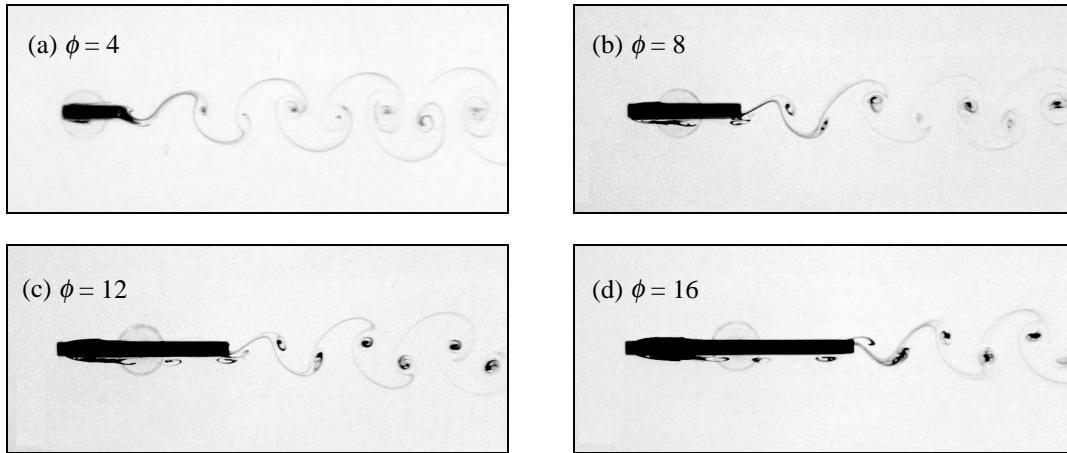


Figura 6 – Imagens das camadas cisalhantes ao redor de cilindros retangulares ($Re_B = 300$).

A Figura 7 apresenta a evolução temporal das linhas de corrente, para o escoamento ao redor de um cilindro retangular com razão de forma $\phi = 7$ e $Re_B = 300$.

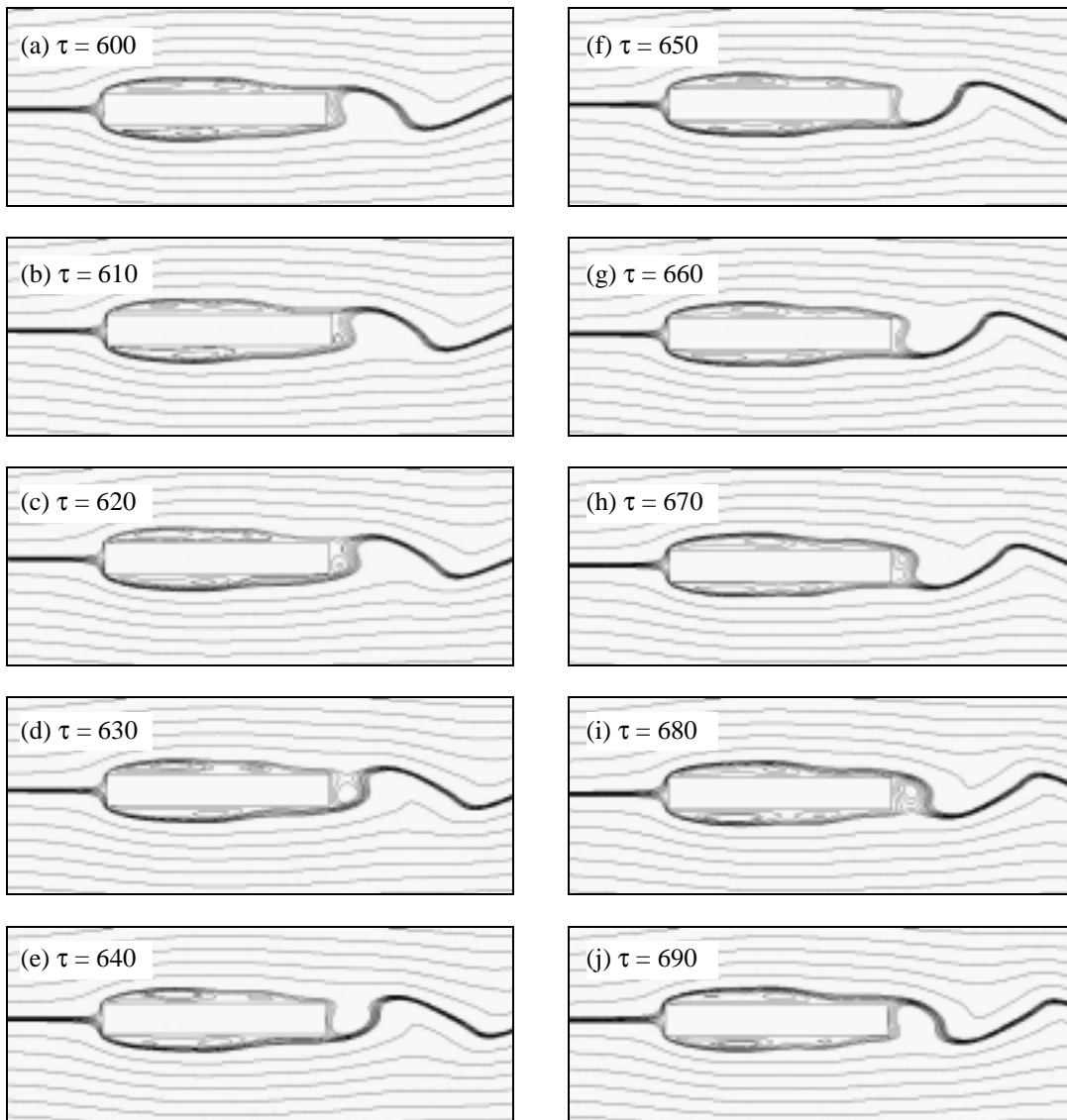


Figura 7 – Evolução temporal das linhas de corrente para um cilindro retangular ($\phi = 7$).

Estes resultados mostram, com bom nível de detalhes, a evolução das bolhas de recirculação sobre as superfícies laterais do cilindro, para um ciclo completo de desprendimento de vórtices. Como observa-se, tanto numérica como experimentalmente, a evolução e fragmentação dessas bolhas dão início ao processo de desprendimento dos vórtices sobre a superfície alongada do cilindro. Verifica-se, nas Figuras 7(h) a 7(j), que estes vórtices são convectados para o bordo de fuga do cilindro, e daí em diante, passam a interagir com a esteira formada a jusante do obstáculo.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico e experimental do escoamento ao redor de cilindros retangulares com razão de forma variando entre 1 e 16, para números de Reynolds relativamente baixos.

Os resultados experimentais, obtidos através de ensaios em um túnel hidrodinâmico, foram complementados com os resultados numéricos, obtidos com a utilização do código FLUENT[®]5.0. Os dados numéricos e experimentais correspondentes ao número de Stouhal, além de apresentarem boa concordância entre si, mostraram-se de bom acordo com aqueles encontrados na literatura. Em particular, identifica-se uma melhor concordância dos resultados numéricos gerados neste trabalho, do que aqueles obtidos nas simulações de Nakamura *et al.* (1996), quando comparados com os dados experimentais disponíveis.

Visualizações numéricas e experimentais do escoamento também foram utilizadas como ferramentas para a análise das instabilidades presentes sobre as superfícies alongadas dos cilindros. Em ambos os casos, foi possível identificar a presença das instabilidades do tipo *Impinging Shear Layer Instability* (ISLI). Em contraste aos resultados de Nakayama *et al.* (1993), as simulações numéricas realizadas no presente trabalho, captaram a presença de bolhas que se tornam instáveis sobre as laterais do cilindro, as quais se alongam e fragmentam-se dando origem aos vórtices discretos que são convectados para a jusante do obstáculo.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com recurso financeiros provenientes da FAPESP (proc. 97/12818-3 e proc. 98/12990-3). Os autores agradecem, ainda, o apoio da PROPP/UNESP.

6. REFERÊNCIAS

- Davis, R.W., Moore, E.F. & Purtell, L.P., 1984, A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders, *Physics of Fluids*, vol.27, n.1, pp.46-59.
- Leonard, B.P., 1979, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, *Comp. Meth. Appl. Mech. & Engng*, pp.59-98.
- Lindquist, C., Mansur, S.S. & Vieira, E.D.R., 1999, Influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal de cilindros quadrados, *in: Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM'99*, ABCM, CD-ROM, Águas de Lindóia.
- Nakamura, Y., Ohya, Y., Ozono, S. & Nakayama, R., 1996, Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers $200-10^3$, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.65, pp.301-308.
- Nakayama, Y., Nakamura, Y., Ohya, Y. & Ozono, S., 1993, A numerical study on the flow around flat plates at low Reynolds numbers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol.46-47, pp.255-264.
- Ohya, Y., Nakamura, Y., Ozono, S., Tsuruta, H. & Nakayama, R., 1992, A numerical study of

- vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.236, pp.445-460.
- Okajima, A., 1982, Strouhal numbers of rectangular cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.123, pp.379-398.
- Patankar, S.V. & Spalding, D.B., 1972, A calculation procedure for heat and mass transfer in three-dimensional parabolic flows, *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.15, pp.1787-1806.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW PAST OVER RECTANGULAR CYLINDERS: INFLUENCE OF FORM RATIO

This work presents a numerical and experimental investigation on the influence of the side ratio over the flow past rectangular cylinders, for Reynolds numbers up to 10^3 . The side ratio, defined as the ratio between the height and the width of the cylinder rectangular cross section, has been varied from 1 to 16. The experimental tests have been conducted in a vertical water tunnel operated by gravity. The vortex shedding frequency in the wake has been determined using hot film anemometry. Images from the cylinder wake and the shear layers over the surfaces have been obtained with flow visualization techniques. The numerical simulations have been performed using the finite volumes method without turbulence models, using the QUICK scheme for convective transport and the SIMPLEC algorithm for the pressure-velocity coupling. The numerical and experimental results have shown good agreement with the literature data.