

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE CILINDROS DE BASE QUADRADA: INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE BLOQUEIO

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

Claudio Lindquist – lindquis@dem.feis.unep.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 propõe uma investigação numérica e experimental da influência da razão de bloqueio sobre o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada, para $Re = 500$. A razão de bloqueio, definida como a relação entre a área frontal do cilindro e a área transversal da seção de testes, foi variada entre 2,5% e 30%. Os ensaios experimentais foram conduzidos num túnel hidrodinâmico vertical, operado em modo contínuo. A frequência de emissão dos vórtices na esteira turbilhonar foi determinada, a partir da análise espectral do sinal de velocidades, coletado por uma sonda de filme quente posicionada a jusante do cilindro. Imagens do escoamento foram, também, obtidas, mediante a injeção de corante líquido a montante do corpo sólido. As simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do programa computacional FLUENT[®] 5.0, que emprega o método dos volumes finitos na discretização espacial das equações governantes. As simulações foram realizadas utilizando-se o algoritmo SIMPLC, para o acoplamento pressão-velocidade, juntamente com o esquema QUICK, para o tratamento dos termos convectivos. Os resultados numéricos e experimentais encontram-se em bom acordo e permitindo a compreensão de alguns fenômenos físicos que caracterizam este tipo de escoamento.*

***Palavras-chave:** Cilindro quadrado; razão de bloqueio; esteira de von Kármán; simulação numérica; anemometria de filme quente.*

1. INTRODUÇÃO

O escoamento ao redor de corpos cilíndricos caracteriza-se pela formação de uma esteira a jusante do obstáculo, cujo comportamento dinâmico sofre influência de diversos fatores. Em determinadas circunstâncias, este escoamento ocorre como se o objeto sólido estivesse posicionado em meio fluido infinito; em outras palavras, sem nenhum tipo de confinamento. Esta situação pode ser encontrada, na prática, quando correntes naturais de ar ou de água circundam objetos isolados, tais como edifícios, pilares de pontes, cabos de transmissão de energia elétrica ou *risers* de extração de petróleo. Em outros casos, entretanto, o movimento

do fluido é afetado pela presença de paredes sólidas nas proximidades do cilindro, como acontece, por exemplo, no interior de medidores de vazão a efeito vórtice (*vortex meters*), onde o elemento gerador de turbilhões encontra-se imerso num escoamento confinado pela tubulação. O bloqueio sólido provoca, então, um aumento da velocidade do escoamento nas imediações do obstáculo, modificando profundamente o padrão de emissão de vórtices. Essa alteração se reflete sobre alguns dos principais parâmetros que caracterizam o escoamento, dentre os quais inclui-se o número de Strouhal, dado por:

$$St = \frac{f B}{U_{\infty}} \quad (1)$$

onde f é frequência de emissão dos vórtices, B é a dimensão característica do obstáculo e U_{∞} representa a velocidade de aproximação da corrente livre.

Nas últimas décadas, vários pesquisadores preocuparam-se em estudar as mudanças observadas no escoamento em torno de corpos cilíndricos, em função da razão de bloqueio sólido, definida, em termos percentuais, pela relação:

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{st}} \cdot 100\% \quad (2)$$

onde A_{cp} é a área frontal projetada do corpo e A_{st} é a área total da seção oferecida ao escoamento, sem a presença do obstáculo sólido. Na maior parte destes estudos, o número de Reynolds é calculado sem levar em consideração o efeito de confinamento, a partir da expressão:

$$Re = \frac{U_{\infty} B}{\nu} \quad (3)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

West & Apelt (1982) investigaram os efeitos da bloqueio sobre o escoamento ao redor de cilindros de base circular, para números de Reynolds situados entre 10^4 e 10^5 . Seus resultados mostram que, para bloqueios menores que 6%, os efeitos do confinamento sobre a distribuição de pressão e sobre o coeficiente de arrasto são pouco importantes, enquanto que o número de Strouhal não é sequer afetado de maneira perceptível. Já para razões de bloqueio maiores do que 6%, verifica-se uma considerável distorção no campo de escoamento, tornando os efeitos do confinamento bastante complexos.

Davis *et al.* (1984) apresentam um trabalho numérico e experimental sobre o escoamento confinado ao redor de cilindros com seção transversal retangular e quadrada. Neste caso, os parâmetros investigados foram o número de Reynolds, a razão de forma da seção retangular, a razão de bloqueio e o perfil de velocidade da corrente livre na entrada do domínio computacional. Seus resultados sugerem que, para valores do número de Reynolds entre 100 e 1850 e razões de bloqueio variando de 0 a 25%, tanto o número de Strouhal quanto o coeficiente de arrasto de cilindros quadrados aumentam significativamente com o bloqueio sólido. Em alguns casos foram observadas, também, estruturas turbilhonares movendo-se entre a esteira e as paredes adjacentes, principalmente para números de Reynolds mais elevados.

Mais recentemente, Suzuki *et al.* (1993) empreenderam um amplo estudo sobre o escoamento em torno de cilindros com seção transversal quadrada, realizando simulações

numéricas para diferentes números de Reynolds, perfis de velocidade da corrente livre e razões de bloqueio sólido, obtendo, para cada caso, o número de Strouhal e o coeficiente de arrasto. Utilizando um canal, onde o fluido permanece em repouso e o objeto se desloca para produzir o escoamento, os autores obtiveram importantes dados experimentais, que se prestaram à validação dos resultados numéricos. Visualizações do escoamento foram, também, efetuadas, revelando detalhes finos do escoamento na esteira do cilindro e nas proximidades das paredes do canal.

O presente trabalho acrescenta informações complementares às investigações anteriores, fornecendo resultados, numéricos e experimentais, para o escoamento ao redor de cilindros de base quadrada, a número de Reynolds 500, com razões de bloqueio compreendidas entre 2,5 e 30%. Especial atenção é dispensada à análise de imagens do escoamento, que colocam em evidência mecanismos de interação entre as camadas cisalhantes que circundam o obstáculo e a camada limite que se desenvolve nas paredes do canal.

2. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

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 trabalho, este sistema de equações foi resolvido com o auxílio do código computacional FLUENT®5.0, considerando-se, adicionalmente, o escoamento bidimensional e as propriedades físicas do fluido constantes.

Através deste programa, as equações do movimento são discretizadas, no espaço, pelo método dos volumes finitos, sendo permitido ao usuário a escolha de diferentes algoritmos para o acoplamento pressão-velocidade, bem como a seleção de diferentes esquemas para o tratamento dos termos convectivos. Para a obtenção dos resultados apresentados neste artigo, optou-se, em particular, pela utilização do 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 aqui abordados.

A Figura 1 ilustra, de maneira genérica, o domínio computacional utilizado, constituído por malhas retangulares e uniformes. Diferentes razões de bloqueio foram obtidas, mantendo-se fixas as dimensões nominais do obstáculo e alterando-se, por conseguinte, a dimensão H do domínio de cálculo, como mostra a Tabela 1.

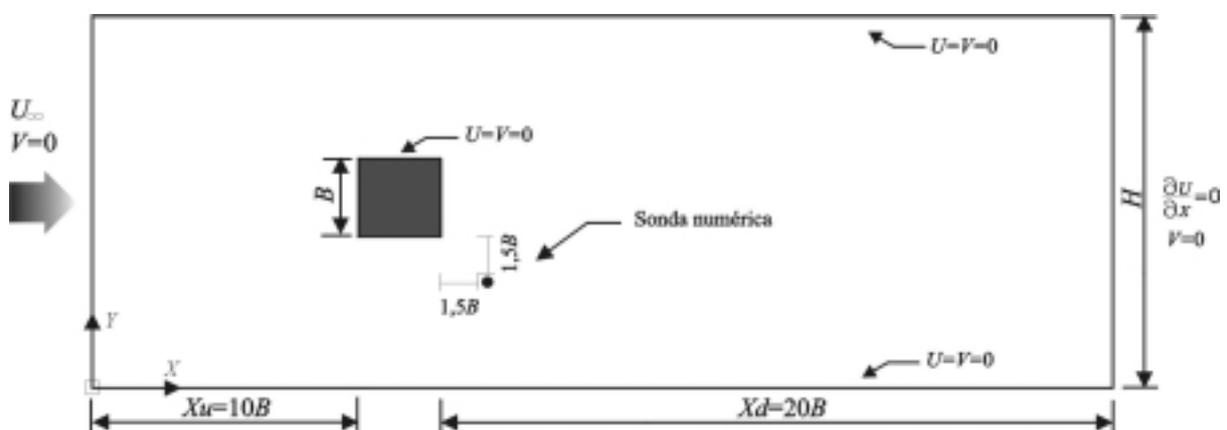


Figura 1 – Características gerais do domínio computacional e condições de contorno.

Tabela 1 – Configurações dos domínios computacionais utilizados.

Caso	Bloqueio	Malha	H
1	2,5 %	248 × 320	40B
2	10 %	248 × 80	10B
3	15 %	248 × 54	6,7B
4	20 %	248 × 40	5B
5	25 %	248 × 32	4B
6	30 %	248 × 27	3,3B

Em todos os casos analisados, as mesmas condições de contorno foram impostas, quais sejam: 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. Considerou-se, adicionalmente, que as paredes do canal e do obstáculo 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 $\Delta\tau$ em 0,02. O tempo adimensional τ , neste caso, relaciona-se com o tempo real t , através da expressão:

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

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.

A jusante do obstáculo, na posição ilustrada Figura 1, foi inserida uma sonda numérica, programada para registrar a evolução temporal da componente V da velocidade. A frequência de emissão dos vórtices f , necessária à determinação do número de Strouhal, foi obtida a partir da análise espectral do sinal assim adquirido, transformado para domínio da frequência, com o auxílio da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

3. INSTALAÇÃO E TÉCNICA EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram conduzidos em um túnel hidrodinâmico vertical, com seção de testes medindo 146×146×500 mm, trabalhando em modo contínuo de operação, com água da rede urbana. Maiores detalhes sobre as características construtivas e operacionais do túnel, que aparece ilustrado na Figura 2, são fornecidos por Lindquist *et al* (1999).

A velocidade U_{∞} da corrente livre foi determinada com base na leitura da vazão, fornecida por um medidor eletromagnético, assumindo-se um perfil de velocidade uniforme no interior da seção de testes.

Ao contrário do procedimento adotado nas simulações numéricas, para fazer variar experimentalmente a razão de bloqueio, foram empregados seis diferentes corpos cilíndricos de base quadrada, cujas características dimensionais encontram-se resumidas na Tabela 2. Cada um destes modelos foi firmemente engastado na janela posterior da seção de testes, com ângulo de incidência nulo. A frequência de emissão dos vórtices foi, então, determinada, aplicando-se o mesmo método utilizado na obtenção dos resultados numéricos correspondentes. Desta vez, entretanto, o sinal de velocidades foi adquirido por intermédio de uma sonda anemométrica de filme quente 55R11, produzida pela Dantec Inc., posicionada na esteira do cilindro.

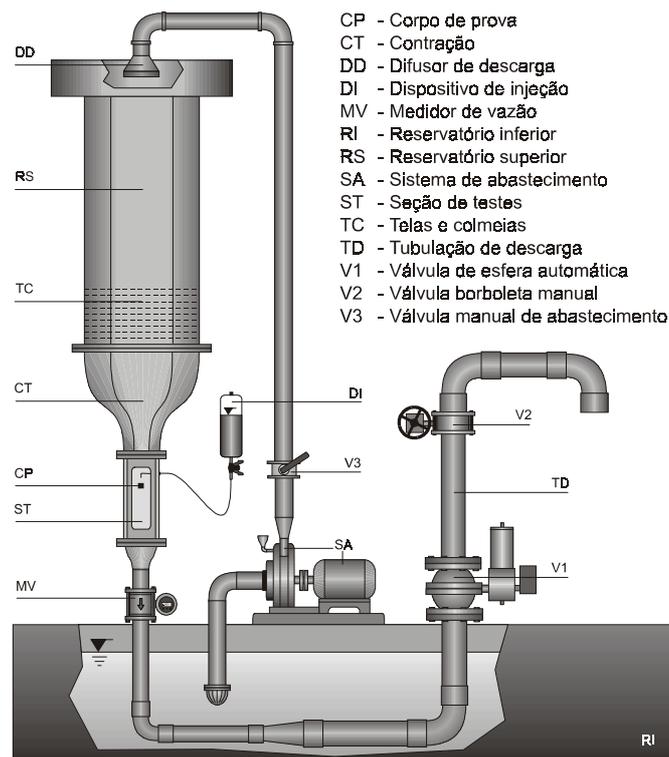


Figura 2 – Túnel hidrodinâmico vertical operado pela ação da gravidade.

Tabela 2 – Principais características dos corpos cilíndricos utilizados.

Modelo	B [mm]	β nominal (%)
1	3,03	2,5
2	12,57	10
3	19,02	15
4	24,92	20
5	31,44	25
6	38,01	30

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a curva Strouhal *versus* razão de bloqueio para o escoamento ao redor de cilindros de seção quadrada, com número de Reynolds igual a 500 e razões de bloqueio variando entre 2,5 e 30%, observando-se a boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos.

É fácil verificar que, à medida em que cresce o bloqueio, ocorre, também, um aumento significativo no número de Strouhal. A maior ou menor proximidade das paredes que confinam o escoamento altera substancialmente a magnitude e a forma do perfil de velocidades na vizinhança lateral do cilindro. Além disso, as camadas cisalhantes que se formam sobre as superfícies do cilindro, ao atingirem o bordo de fuga, podem sofrer grande interação com a camada limite que evolui ao longo das paredes do canal, dependendo, evidentemente, do nível de confinamento imposto pelo obstáculo. Este efeito se faz sentir de maneira bastante nítida na esteira de vórtices, que se torna, proporcionalmente, cada vez mais achatada, à medida em que a razão de bloqueio aumenta. Como consequência, a frequência adimensional de emissão dos vórtices cresce cerca de 60%, quando a razão de bloqueio varia de 2,5 a 30%.

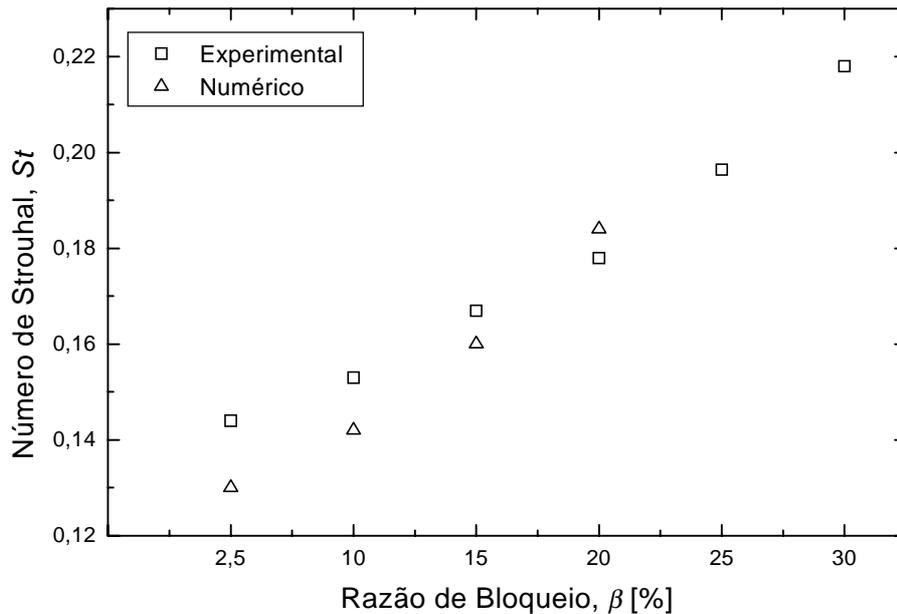


Figura 3 – Curva Strouhal vs razão de bloqueio para cilindros quadrados, $Re = 500$.

A Figura 4 apresenta imagens obtidas experimentalmente, por injeção de corante líquido, que ilustram as mudanças produzidas na configuração da esteira de cilindros quadrados, quando ocorrem variações na razão de bloqueio de 2,5 a 25%. A título de esclarecimento, deve-se ressaltar que os limites laterais observados nestas imagens não representam as paredes da seção de testes do túnel hidrodinâmico, que, na verdade, não podem ser vistas, devido às dimensões reduzidas das janelas de observação visual.

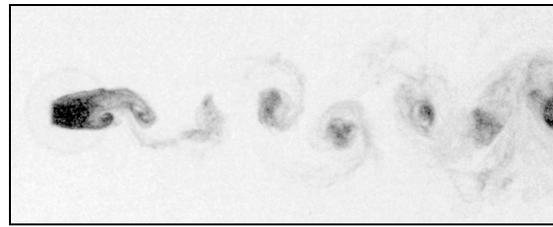
Na Figura 4(a), correspondente a $\beta = 2,5\%$, verifica-se a formação de uma esteira de von Kármán bem definida atrás do obstáculo, que apresenta, entretanto, um espaçamento irregular entre vórtices. Com o aumento da razão de bloqueio para $\beta = 10\%$, Figura 4(b), observa-se apenas uma pequena alteração na configuração da esteira em relação ao caso anterior, ainda que haja uma sensível mudança na frequência de emissão dos vórtices. Aqui, o maior tamanho do obstáculo já permite a visualização de detalhes mais finos do escoamento, que se manifestam através de pequenas estruturas secundárias, presentes no interior dos grandes vórtices transportados ao longo da esteira.

Como era de se esperar, aumentando-se ainda mais a razão de bloqueio, observa-se uma influência crescente das paredes da seção de testes sobre a esteira de vórtices. Nas imagens fornecidas pelas Figuras 4(c) a 4(e), observa-se claramente o achatamento dos vórtices, evidenciando a ação mecânica das paredes da seção de testes sobre o escoamento.

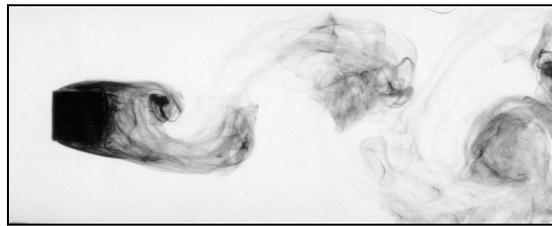
Para $\beta = 30\%$, não são apresentadas imagens do escoamento, uma vez que a esteira turbilhonar encontra-se quase totalmente oculta pelos limites da janela de observação da seção de testes. Os resultados observados durante a realização dos ensaios, entretanto, reforçam a constatação de que a influência das paredes sobre a esteira se torna cada vez mais importante, à medida em que cresce o bloqueio do escoamento.

A Figura 5 apresenta imagens oriundas da simulação numérica do escoamento, obtidas para razões de bloqueio compreendidas entre 10 e 30%. Estes resultados tornam ainda mais evidente o achatamento da esteira de vórtices e a sua interação com as camadas limites formadas junto às parede do canal. À medida em que a razão de bloqueio assume valores superiores a 10 %, observa-se, também, um menor espaçamento entre vórtices. Para $\beta = 20\%$, impedidos de se expandir, os centros dos vórtices ficam localizados praticamente sobre a linha de centro do canal, durante praticamente todo o seu percurso. Observa-se, ainda, a

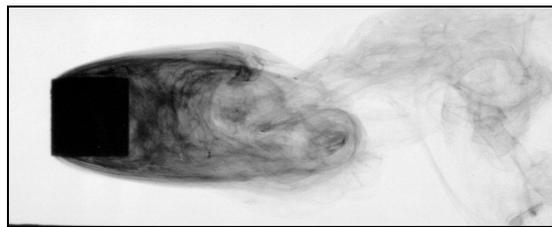
presença de regiões instáveis nas camadas limite próximas às paredes que, aparentemente, passam a ser succionadas pelas regiões de baixa pressão situadas nos centros dos turbilhões. A ocorrência deste fenômeno deve ser confirmada experimentalmente, mediante a visualização do escoamento nas camadas limite da seção de testes.



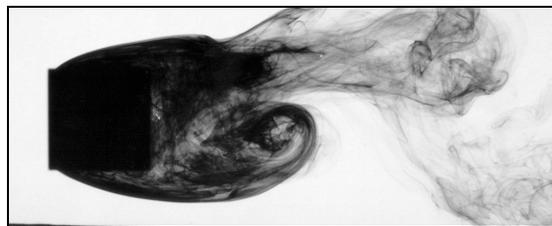
(a) $\beta = 2,5\%$



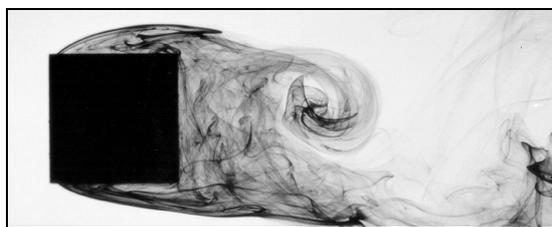
(b) $\beta = 10\%$



(c) $\beta = 15\%$



(d) $\beta = 20\%$



(e) $\beta = 25\%$

Figura 4 – Visualização experimental do escoamento ao redor de cilindros quadrados, para diferentes razões de bloqueio e $Re = 500$.

É importante salientar que, para $\beta = 25$ e 30% , não se verificou, numericamente, a emissão de vórtices na esteira, como observado nos ensaios experimentais. Os mapas de vorticidade das Figuras 5(d) e 5(e) sugerem que a grande proximidade entre as camadas limite sobre as fronteira sólidas do domínio de cálculo e as laterais do obstáculo restringe a

separação das camadas cisalhantes sobre as arestas do cilindro, inibindo fortemente o aparecimento da esteira de von Kármán. Embora esta observação possa parecer fisicamente consistente, ressalta-se a falta de concordância entre os resultados numéricos da Figura 5(d), com os equivalentes experimentais da Figura 4(e), onde se observa nitidamente a presença de uma estrutura turbilhonar bem definida, logo a jusante do obstáculo.

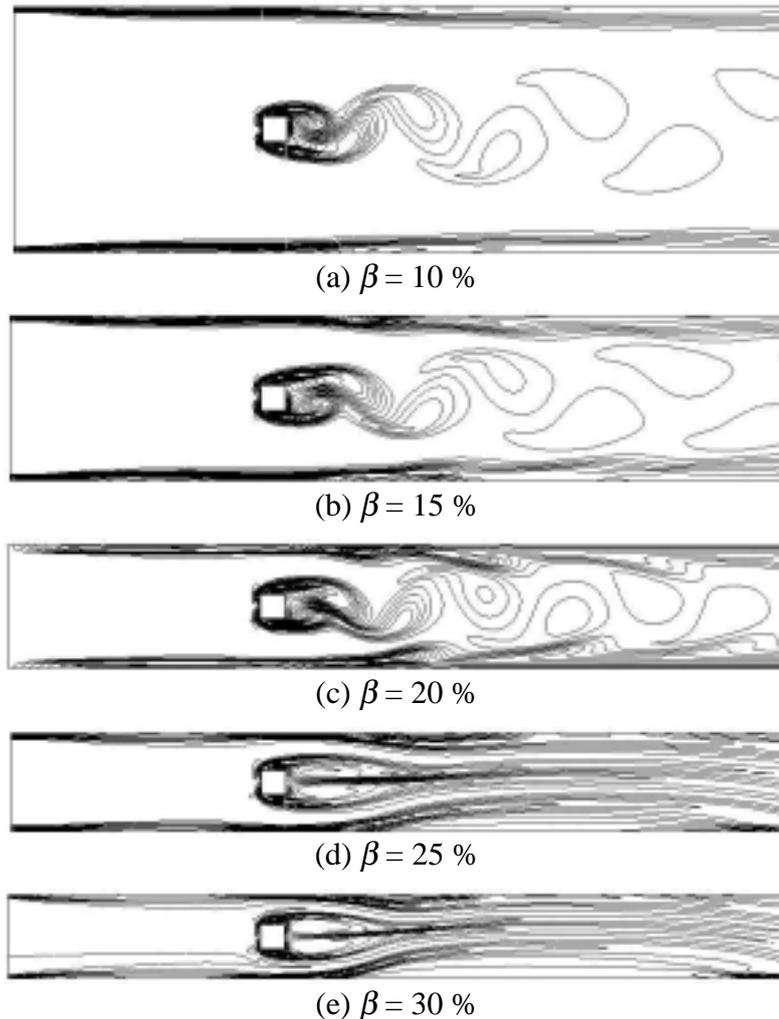


Figura 5 – Mapas de isovorticidade, obtidos para o escoamento ao redor de cilindros quadrados, com diferentes razões de bloqueio e $Re = 500$.

Para melhor estudar a questão, uma simulação adicional, com malha mais refinada, resolução 320×200 foi realizada, para a mesma razão de bloqueio $\beta = 25\%$. Este teste foi conduzido com a principal finalidade de verificar a independência dos resultados numéricos, com relação à malha computacional empregada. A Figura 6 apresenta, através das linhas de corrente e isovorticidade o campo de escoamento obtido nesta simulação, onde se verificam diferenças importantes com relação à Figura 5(d), sobretudo nas regiões próximas às paredes do canal. Isto indica que estes resultados ainda não podem ser considerados completamente independente da malha, como acontece com as simulações realizadas com razões de bloqueio menores – $\beta = 20\%$.

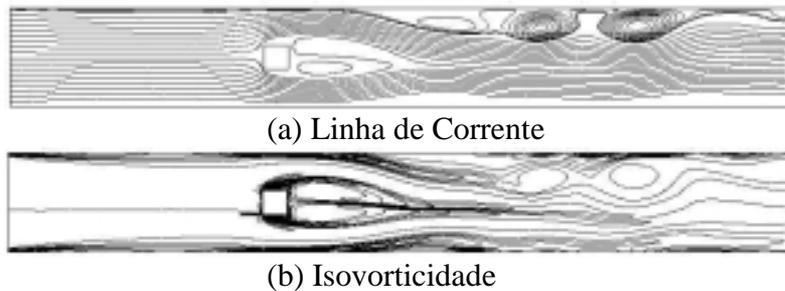


Figura 6 – escoamento ao redor de um cilindro quadrado com razão de bloqueio igual a 25% e $Re = 500$ – malha 320×200 .

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se um estudo numérico e experimental do escoamento ao redor de cilindros com seção transversal quadrada, para diferentes razões de bloqueio e número de Reynolds igual a 500.

Visualizações numéricas e experimentais foram realizadas, evidenciando a forte interação que pode haver entre as camadas cisalhantes que se desenvolvem sobre as faces do obstáculo e as camadas limites que se formam junto às paredes que confinam o escoamento. Estas interações modificam substancialmente o padrão de emissão de vórtices e, portanto, a própria dinâmica do escoamento.

Ainda que se revistam de um caráter preliminar, os resultados numéricos apresentam concordância satisfatória com aqueles obtidos experimentalmente, atestando o potencial do programa computacional utilizado, enquanto ferramenta de análise para este tipo de escoamento.

Agradecimentos

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

6. REFERÊNCIAS

- Davis, R.W., Moore, E.F. & Purtell, L.P., A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders, *Physics of Fluids*, vol.27, n.1, pp.46-59, 1984.
- 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.
- 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.
- Suzuki, H, Inoue, Y., Nishimura, T, Fukutani, K & Suzuki, K, Unsteady flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol.14, n.1, pp.2-9, 1993.
- 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*, vol.114, pp.361-377, 1982.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW PAST OVER SQUARE CYLINDERS: INFLUENCE OF BLOCKAGE RATIO

This work presents a numeric and experimental investigation of blockage ratio effects on the flow past over square cylinders, for Reynolds numbers equal to 500. The blockage ratio, defined as the relationship between the front area of the cylinder and the transverse area of the test section, was varied between 2,5% to 30%. The experimental tests were driven in a vertical hydrodynamic tunnel, operated in continuous way. The frequency of vortex shedding in the cylinder wake was determined using the hot film anemometry. Images of the von Kármán wake formed upstream of the cylinder was obtained with the aid of visualization techniques. The numerical simulations were accomplished using the computational program FLUENT[®]5.0, employing the volume finite method in the spatial discretization of the governing equations. The simulations were conducted with the algorithm SIMPLEC for the coupling pressure-velocity, associated with the scheme QUICK for the treatment of convective terms. The numerical and experimental results shown a good agreement, permitting to obtain fine characteristics of the flow.