

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE SOBRE O NÚMERO DE STROUHAL DE CILINDROS COM SEÇÃO TRANSVERSAL QUADRADA

Cláudio Lindquist

Sérgio S. Mansur

Edson D. R. Vieira

UNESP / Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56 – 15385-000 – Ilha Solteira, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho apresenta uma análise experimental do escoamento em torno de cilindros de seção transversal quadrada, posicionados perpendicularmente ao escoamento livre. Em particular, investigou-se a influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal, para números de Reynolds inferiores a 500. O ângulo de ataque, formado entre a direção do escoamento livre e a normal à face anterior do modelo, foi variado entre 0 e 45 graus. A instalação experimental empregada na condução dos ensaios é constituída por um túnel hidrodinâmico vertical, operado pela ação da gravidade. O número de Strouhal foi determinado a partir de medidas de velocidade realizadas na esteira de vórtices, através de anemometria de filme quente. Alguns dos resultados obtidos são comparados com dados da literatura e com informações quantitativas obtidas pelo emprego de técnicas de visualização e análise de imagens dinâmicas do escoamento.*

Palavras-chave: *Cilindro quadrado, Ângulo de incidência, Número de Strouhal, Anemometria de filme quente, Visualização de escoamentos.*

1. INTRODUÇÃO

O escoamento em torno de corpos cilíndricos não aerodinâmicos tem sido objeto de inúmeras investigações ao longo das últimas décadas, constituindo um tema de pesquisa relevante e atual. De fato, muitos dos fenômenos que ocorrem na esteira de cilindros são, ainda hoje, apenas parcialmente compreendidos, despertando grande interesse científico.

A maioria dos trabalhos sobre o assunto concentram sua atenção no estudo do escoamento ao redor de cilindros circulares. Entretanto, cilindros de seção transversal quadrada imersos no escoamento de gases e líquidos são freqüentemente observados em aplicações da engenharia – perfis metálicos, pilares, vigas e mesmo edificações submetidos à ação do vento ou de correntes fluviais ou marítimas representam exemplos clássicos deste tipo de situação. Nestes casos, o ângulo de incidência – formado entre a direção do escoamento livre e a normal à face anterior do corpo sólido – apresenta forte influência sobre a dinâmica do escoamento, responsável direta por alguns dos esforços que atuam sobre a estrutura.

Vickery (1966) realizou um estudo experimental do escoamento ao redor de um cilindro de seção transversal quadrada, em que analisa a influência da turbulência de grande escala e do ângulo de ataque sobre alguns parâmetros do escoamento, tais como os coeficientes de sustentação, de arrasto e de pressão na base, além do número de Strouhal. Medindo a flutuação de pressão na superfície do corpo e utilizando um extensômetro unidirecional instalado no seu interior, Vickery verificou a influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal, para números de Reynolds compreendidos entre 4×10^4 a $1,6 \times 10^5$. Segundo o autor, dentro de sua incerteza experimental, o número de Strouhal não apresentou dependência com o número de Reynolds. Infelizmente, seus resultados abrangem apenas poucos valores do ângulo de ataque.

Obasaju (1983) investigou as alterações que ocorrem no escoamento ao redor de um cilindro de seção quadrada quando o ângulo de ataque é variado entre 0° e 45° , para números de Reynolds da ordem de 10^4 . Para a determinação da frequência de emissão dos vórtices, foi utilizado um transdutor de pressão, instalado no interior do cilindro, além de uma sonda de fio quente, posicionada na esteira formada à jusante do corpo. Seus resultados apresentam algumas discrepâncias quando comparados com os de outros autores, que também divergem entre si. O autor atribui esta discordância à diferença entre os números de Reynolds e, possivelmente, diferentes intensidades turbulentas dos vários resultados.

Norberg (1993) conduziu uma investigação experimental do escoamento em torno de cilindros retangulares com ângulo de ataque variando entre 0° e 90° , para números de Reynolds entre 400 a 3×10^4 . As forças e momentos induzidos pelo escoamento sobre os cilindros puderam ser estimadas com base nas medidas da distribuição de pressão estática na superfície dos modelos, enquanto que a frequência de emissão de vórtices foi determinada com o auxílio de um anemômetro de fio quente. Para cilindros quadrados, o autor observou que para um número de Reynolds igual de 10^3 , à medida em que o ângulo de ataque aumenta de 0° para aproximadamente 15° , o número de Strouhal cresce significativamente. Neste ângulo, a curva de Strouhal atinge um ponto de máximo local, e então decai de forma assintótica para 0,175.

Ainda que a maior parte dos trabalhos disponíveis na literatura sobre o assunto sejam de natureza experimental, o aumento significativo da capacidade dos computadores tem permitido e incentivado a simulação numérica de escoamentos deste tipo.

Sohankar *et al.* (1997) empreenderam um estudo numérico do escoamento bidimensional transitório ao redor de cilindros retangulares com ângulo de incidência entre 0° e 90° , para números de Reynolds inferiores a 200. Além de apresentar um estudo sistemático da influência de diversos parâmetros computacionais sobre o escoamento calculado, os autores investigaram a influência de alguns parâmetros físicos, tais como o número de Reynolds, a razão de forma (quociente entre os lados da seção retangular) e o ângulo de incidência. Seus resultados, relativos à seção quadrada com ângulo de incidência nulo, quando comparados com os de outros trabalhos numéricos e experimentais, apresentam uma concordância satisfatória, levando em consideração os efeitos de bloqueio, incertezas de medição, diferentes condições de ensaio e efeitos devidos a diversos fatores numéricos.

O presente trabalho realiza uma investigação experimental do escoamento ao redor de corpos cilíndricos com seção transversal quadrada, posicionados transversalmente ao fluxo livre com ângulo de incidência variando entre 0° e 45° , para números de Reynolds inferiores a 10^3 . A frequência de emissão de vórtices foi determinada utilizando-se a anemometria de filme quente como principal ferramenta de trabalho.

2. INSTALAÇÃO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1. Túnel Hidrodinâmico

Os ensaios experimentais foram conduzidos num túnel hidrodinâmico vertical em circuito aberto, operado pela ação da gravidade, esquematizado na Fig. 1. Sua seção de testes, com dimensões de $146 \times 146 \times 500$ mm, possui quatro amplas janelas de observação, que a tornam especialmente adequada para a realização de ensaios de visualização de escoamentos.

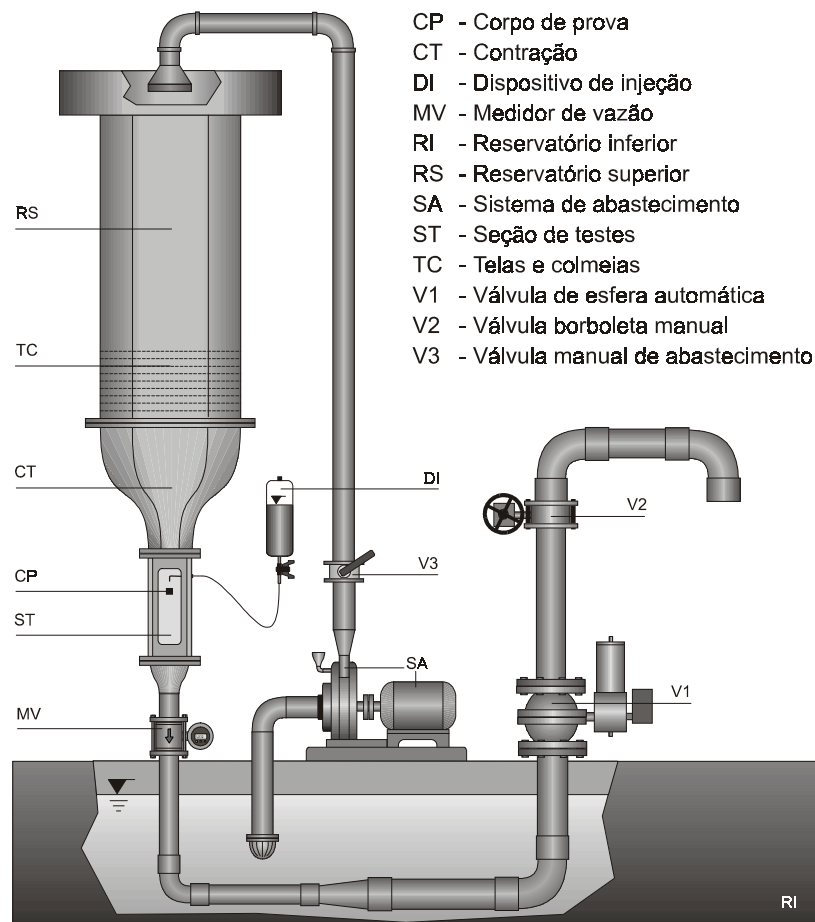


Figura 1 - Ilustração esquemática do túnel hidrodinâmico vertical.

Esta instalação pode ser utilizada em dois modos distintos de operação. No primeiro deles, chamado modo contínuo, as válvulas de controle da vazão (V1 e V2) e a válvula do sistema de abastecimento do túnel (V3) são reguladas de forma a manter o nível de água no reservatório superior constante. Este modo de operação permite a realização de ensaios de longa duração e velocidade constante. No segundo modo de operação, chamado intermitente ou *blow-down*, depois de encher completamente o reservatório superior, o sistema de abastecimento é desligado, aguardando-se a estagnação da água. Então, regulando-se as válvulas de controle da vazão, tem-se início o ensaio, que transcorre enquanto a água contida no reservatório superior escoar para o reservatório inferior. Neste modo de operação, a duração máxima dos ensaios é limitada pelo envelope operacional característico do túnel, e a velocidade média do escoamento no interior da seção de testes diminui continuamente no decorrer do ensaio. No presente trabalho, o primeiro modo de operação foi utilizado.

2.2. Modelo de Ensaio

Durante a realização dos ensaios, utilizou-se um corpo cilíndrico de seção transversal quadrada, cujas principais características geométricas são apresentadas na Fig. 2a. O modelo foi confeccionado em aço inoxidável, retificado e polido, de forma a se obter boa qualidade dimensional, arestas vivas e superfícies lisas. O modelo de ensaio foi firmemente engastado na janela posterior da seção de testes e posicionado com um ângulo de ataque α variando entre 0° e 45° , conforme ilustra a Fig. 2b, medido com o auxílio de um goniômetro, com uma incerteza estimada em $0,5^\circ$.

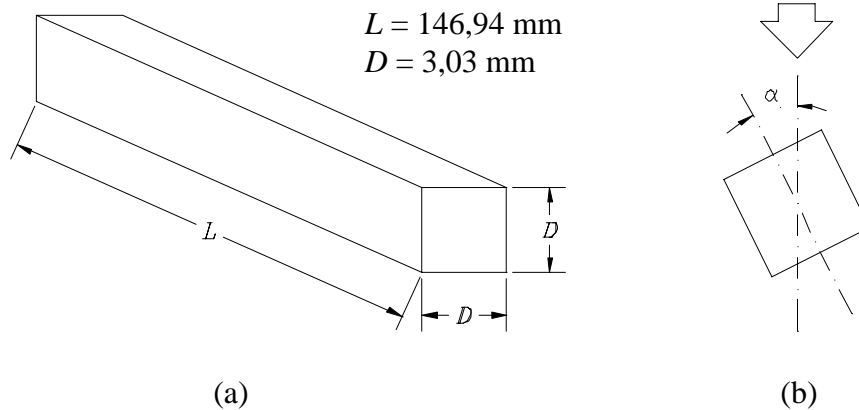


Figura 2 - Modelo cilíndrico de base quadrada utilizado nos ensaios:
(a) características geométricas; (b) ângulo de ataque.

2.3. Técnica Experimental

Para a determinação da frequência de desprendimento de vórtices, foi empregado um anemômetro de temperatura constante Dantec[®] StreamLine modelo 90N10, utilizando um módulo CTA 90C10 e uma sonda de filme quente 55R11, conectados a um sistema de aquisição de dados. Este conjunto é controlado por um programa dedicado, StreamWare versão 1.11, fornecido pelo próprio fabricante do equipamento.

Antes de sua utilização em condições de ensaio, a sonda foi devidamente calibrada em um módulo experimental que produz um jato de água de características dinâmicas conhecidas. Foi utilizada uma correlação do tipo lei de potência, conhecida também como Lei de King, com coeficientes ajustando os dados obtidos com desvio inferior a 5%, dentro da faixa de velocidades prevista.

A sonda foi posicionada a uma distância de 5 diâmetros característicos (D) à jusante do corpo sólido, deslocada de sua linha de centro em 1,5 diâmetros. Esta sonda, instalada num suporte modelo 55H22 em forma de cotovelo, acoplado a um dispositivo posicionador, foi introduzida na seção de testes por uma de suas janelas laterais.

Durante os ensaios propriamente ditos, a frequência de amostragem e o número de pontos adquiridos foram estabelecidos de forma a assegurar que o sinal pudesse representar adequadamente o fenômeno estudado. Assim, o tempo de aquisição para cada medida foi ajustado de forma a abranger a passagem de, no mínimo, 50 vórtices consecutivos, para números de Reynolds em torno de 50. Para números de Reynolds superiores a esse valor, um número típico de vórtices situa-se em torno de 200.

Uma vez coletados os sinais, a frequência de emissão de vórtices foi computada através da aplicação da transformada de Fourier do sinal temporal, sem qualquer tipo de filtragem ou de janelamento. O valor atribuído à frequência de emissão de vórtices corresponde àquele em que a distribuição de densidade de potência espectral atinge seu ponto de máximo. A Fig. 3 ilustra um sinal típico obtido nas condições descritas acima, acompanhado de sua respectiva análise em frequência, onde se observa um pico bem definido, agudo e de banda estreita.

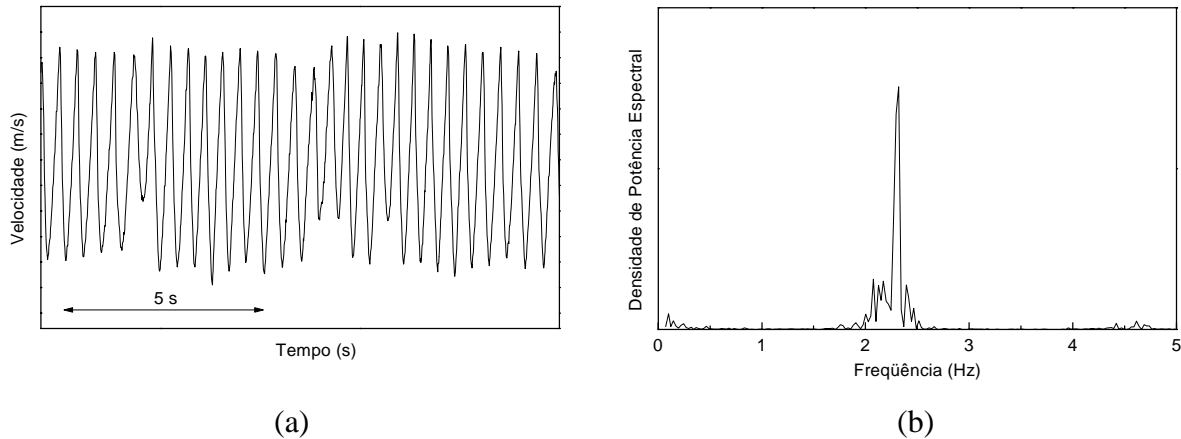


Figura 3 – Sinal de velocidade adquirido para $Re = 150$ e $\alpha = 0^\circ$:
(a) no domínio do tempo; (b) em frequência.

2.4. Parâmetros Adimensionais

Um parâmetro adimensional que exerce grande influência sobre o escoamento ao redor de corpos cilíndricos é o número de Reynolds, aqui definido como

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

onde V é a velocidade média da corrente livre, D é a aresta da seção quadrada e ν é a viscosidade cinemática do fluido. A velocidade média da corrente livre foi determinada medindo-se a vazão do escoamento, com o auxílio de um medidor de vazão eletromagnético (MV na Fig. 1). A viscosidade cinemática da água foi calculada através de uma correlação empírica, em função da temperatura. A incerteza máxima do número de Reynolds foi estimada em 5%.

A razão de aspecto do cilindro, definida como a relação entre seu comprimento (L) e seu diâmetro característico (D), foi mantida em 48. A razão de bloqueio sólido, definida como a relação entre a área longitudinal projetada do modelo e a área transversal da seção de testes, variou entre 2,4%, para $\alpha = 0^\circ$, e 3,4%, para $\alpha = 45^\circ$.

O número de Strouhal pode ser definido como

$$St = \frac{fD}{V} \quad (2)$$

onde f é a frequência de emissão de vórtices na esteira. A incerteza máxima na determinação do número de Strouhal foi estimada em 3%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da fase de obtenção dos resultados propriamente ditos, foi realizado um ensaio preliminar, com o objetivo de avaliar a intensidade turbulenta da corrente livre na linha de centro da seção de testes do túnel, onde posteriormente seria instalado o modelo. A Fig. 4 mostra que, mesmo nas condições mais adversas, verificadas a baixos números de Reynolds, o nível de turbulência manteve-se sempre inferior a 1%.

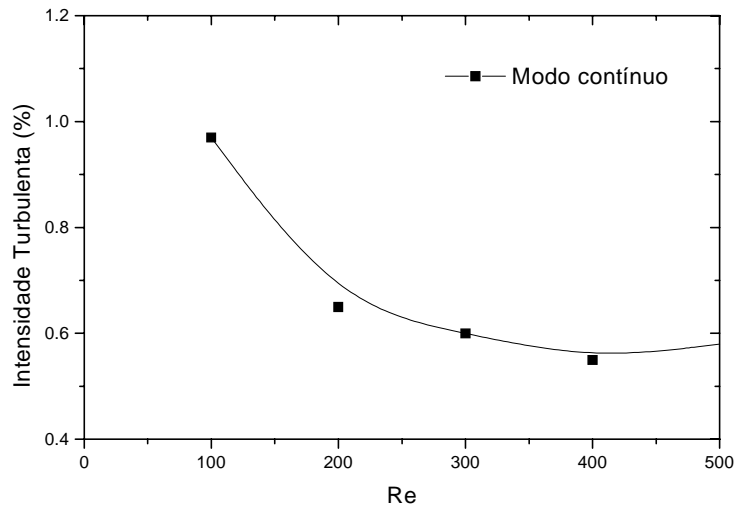


Figura 4 – Intensidade turbulenta da corrente livre no interior da seção de testes (modo contínuo de operação).

A Fig. 5 apresenta, individualmente, todas as curvas Strouhal *versus* Reynolds obtidas para ângulos de ataque variando entre 0 e 45°. Nestas figuras, e também nas seguintes, foram acrescentadas *splines*, apenas para melhor realçar a tendência dos pontos experimentais. Com o auxílio da Eq. (2), pode-se observar que, em todos os casos estudados, à medida em que cresce o número de Reynolds, ocorre inicialmente um aumento acentuado da frequência de emissão dos vórtices, proporcionalmente maior que o correspondente aumento da velocidade. Em seguida, a situação se inverte, o que produz uma diminuição do número de Strouhal, com o aumento do número de Reynolds.

A Fig. 6 mostra a influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal, para números de Reynolds situados entre 50 e 500. Como pode ser observado, a curva de Strouhal atinge um ponto de máximo para valores do ângulo de ataque situados entre 10° e 15°, a partir do que decresce assintoticamente, à medida em que este se aproxima de 45°. Estes resultados encontram-se em concordância com a literatura especializada – Obasaju (1983) e Norberg (1993).

As Fig. 7a e 7b condensam todas as curvas $St \times Re$ e $St \times \alpha$ anteriormente apresentadas, a fim de facilitar a comparação entre elas.

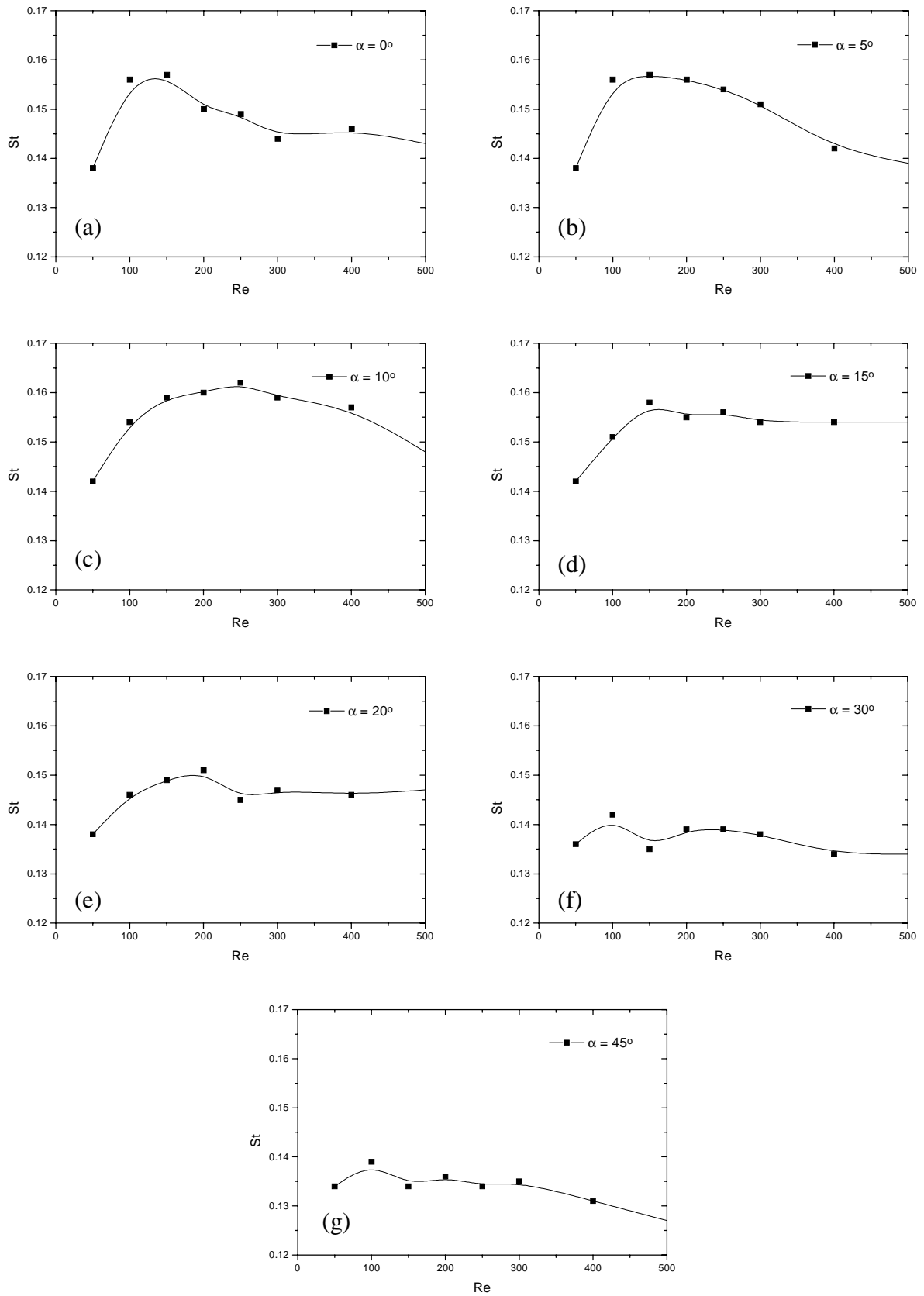


Figura 5 – Curvas Strouhal *versus* Reynolds para ângulos de ataque variando entre 0 e 45° .

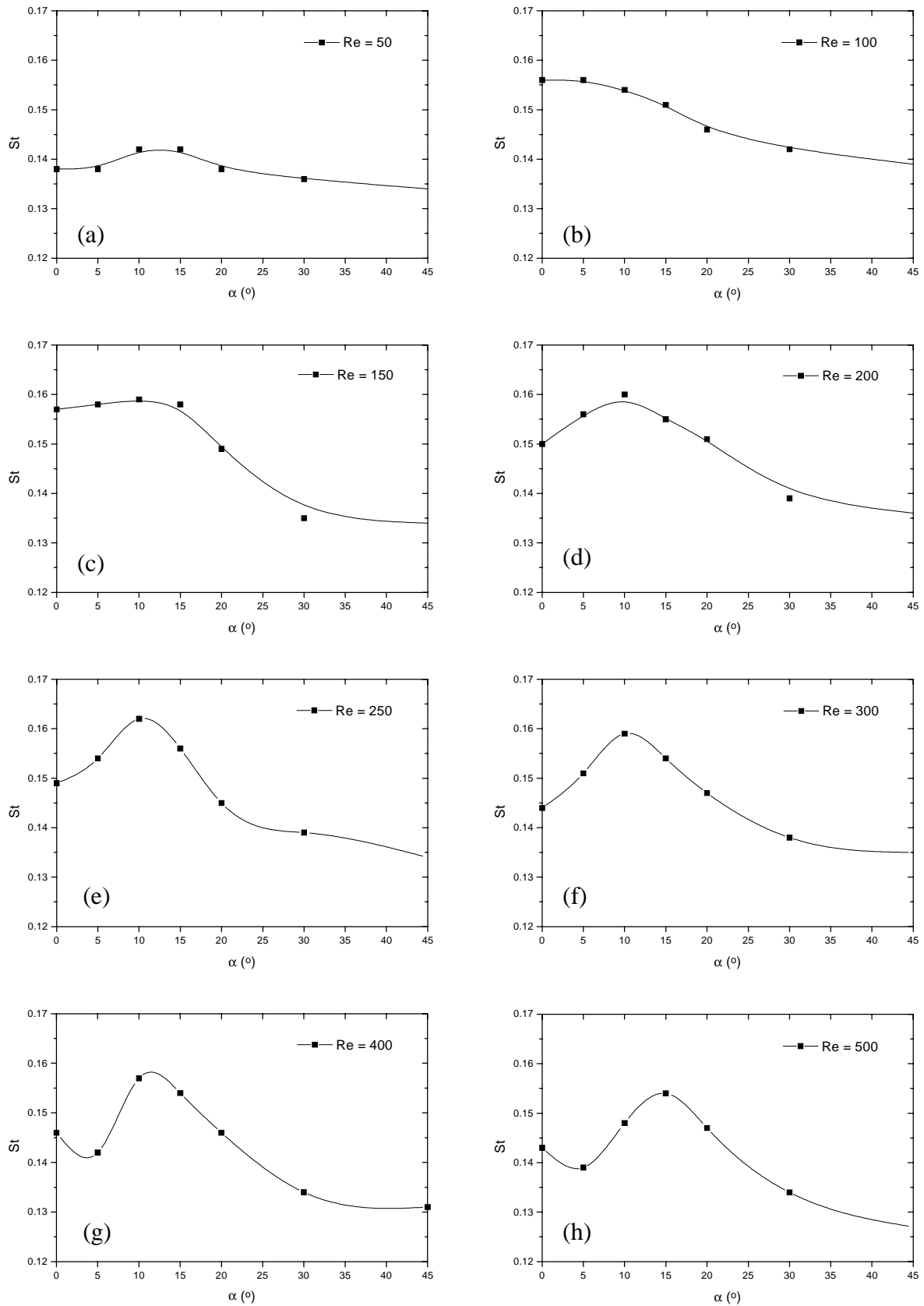


Figura 6 - Influência do ângulo de ataque sobre o número de Strouhal, para números de Reynolds compreendidos entre 50 e 500.

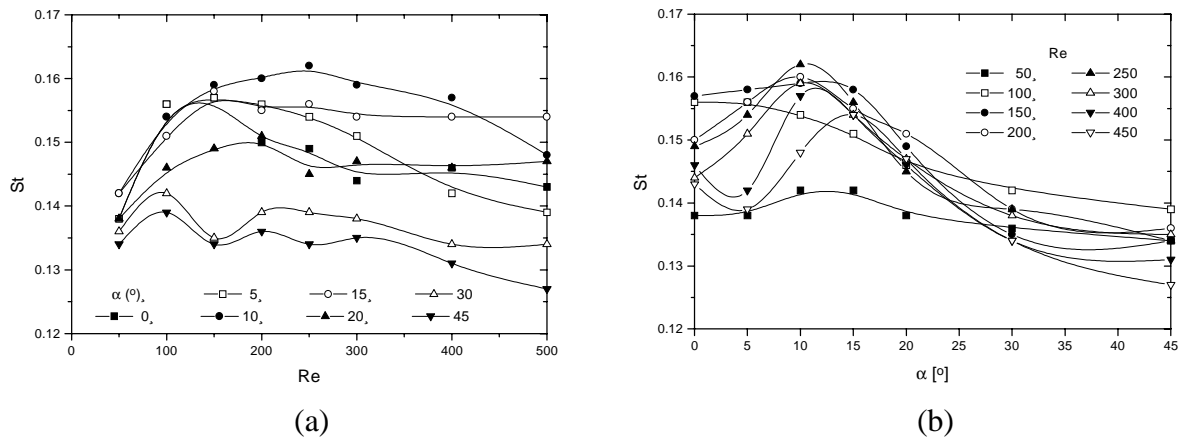


Figura 7 – Comparação entre os diversos resultados obtidos.

A Fig. 8 estabelece uma comparação dos resultados do presente trabalho para ângulo de ataque nulo com outros obtidos anteriormente pelos próprios autores e, ainda, com dados encontrados na literatura. Como pode-se observar, a atual curva de Strouhal apresenta valores um pouco mais elevados que as demais, sobretudo na região dos números de Reynolds mais baixos. Vale a pena ressaltar que os dados de Okajima (1982) foram obtidos em um túnel de vento com uma intensidade turbulenta da corrente livre inferior a 0,5%. A curva de Strouhal anteriormente obtida pelos autores (Lindquist *et al.*, 1997) mediante a utilização de uma técnica baseada na visualização de escoamentos e com o túnel operando em modo *blow-down*, que permite a obtenção de intensidades turbulentas da corrente livre significativamente menores do que no modo de operação contínuo, empregado durante a realização dos ensaios conduzidos no âmbito do presente trabalho.

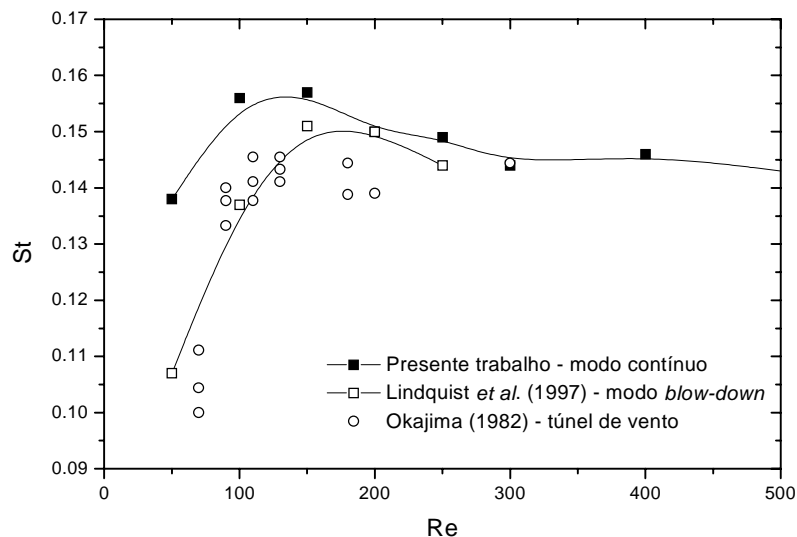


Figura 8 – Comparação com resultados prévios dos autores e com a literatura ($\alpha = 0^\circ$).

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho, que se insere em um programa de pesquisa mais amplo, foram apresentados resultados preliminares, correspondentes à influência do ângulo de ataque sobre o escoamento em torno de cilindros de geometria quadrada. As curvas $St \times Re$ e $St \times \alpha$ apresentadas evidenciam uma tendência comum para os diversos casos analisados, concordando com a literatura. Entretanto, observa-se que estas curvas situam-se ligeiramente acima de resultados anteriormente obtidos próprios autores, e de outros encontrados na literatura. Em vista disso, um estudo mais detalhado sobre a influência da intensidade turbulenta da corrente livre, entre outros parâmetros, se mostra necessário.

Agradecimentos

Os ensaios experimentais foram realizados no Túnel Hidrodinâmico Vertical do Laboratório de Visualização de Escoamentos da UNESP, câmpus de Ilha Solteira. Os autores agradecem à FAPESP pelo suporte financeiro (Proc. N^o 97/12249-9 e 97/12818-3).

REFERÊNCIAS

- Lindquist, C., Vieira, E. D. R. & Mansur, S. S., 1997, Análise experimental do escoamento ao redor de um perfil de base quadrada em dois diferentes ângulos de ataque, *in*: CD-ROM Proceedings of the XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering, paper code 58.
- Norberg, C., 1993, Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 49, pp.187-196.
- Obasaju, E. D., 1983, An investigation of the effects of incidence on the flow around a square section cylinder, *Aeronautical Quarterly*, vol. 34, pp. 243-259.
- Okajima, A., 1982, Strouhal numbers of rectangular cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 123, pp.379-398.
- Sohankar, A, Norberg, C. & Davidson, L., 1997, Numerical simulation of unsteady low-Reynolds number flow around rectangular cylinders at incidence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 69-71, pp. 189-201.
- Vickery, B. J., 1966, Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 25, part 3, pp.481-494.

INFLUENCE OF THE INCIDENCE ANGLE ON THE STROUHAL NUMBER OF SQUARE SECTION CYLINDERS

Abstract. *This work presents an experimental study of the flow around a square section cylinder, placed normally to the free stream. Specifically, it has been investigated the influence of the incidence angle over the Strouhal number for Reynolds numbers up to 500. The incidence angle has been varied from 0 to 45 degrees. The tests have been conducted in a vertical water tunnel, driven by the gravitational action. The Strouhal number has been determined from velocity measurements in the cylinder wake using hot-film anemometry. The present results have been compared with the literature and, in some cases, with quantitative information taken from visualization techniques and image analysis.*

Keywords: *Square cylinder, Incidence angle, Strouhal number, Hot-film anemometry, Flow visualization.*