

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO PERIÓDICO COM VÓRTICES ATRAVÉS DE LASER DOPPLER VELOCIMETRIA

Vilson Carlos da Silva Ferreira
 LTMF - DEMEC - UFRGS
 90050 - 170 - Porto Alegre - RS - Brasil
Sonia Magalhães dos Santos
 Departamento de Física - FURG
 96200-000 - Rio Grande -RS - Brasil

RESUMO

O escoamento ao redor de um obstáculo quase sempre ocorre com o aparecimento de uma esteira de vórtices emitidos numa determinada frequência. O presente trabalho usa a Laser Doppler Velocimetria (LDV) acoplada a um sistema sincronizador de tempo (encoder) para determinar as dimensões dos vórtices, o qual permite individualizar sinais de Doppler espaçados de até 1MHz. O obstáculo em análise é uma placa plana com um ângulo de ataque com relação à direção axial do tubo. O LDV permite medir as componentes axial e circunferencial do escoamento. Para análise qualitativa dos vórtices foram feitas imagens com uma câmara de vídeo CCD.

INTRODUÇÃO

Os vórtices ou turbilhões têm aplicação em medidas de vazão. Eles aparecem quando se introduz um obstáculo, ou quando se provoca uma determinada mudança de direção no escoamento de um fluido.

Segundo De Carlo (1984), para velocidades muito baixas, as linhas fluidas acompanham a forma do obstáculo, não havendo nenhum turbilhão. Quando a velocidade do escoamento aumenta, as linhas não podem mais acompanhar a forma do obstáculo e se separam do seu contorno. Esta separação provoca o aparecimento de velocidades locais muito elevadas, correspondendo a zonas locais de baixa pressão, resultando em tendências à reversão de direção com conseqüente aparecimento de turbilhões: os vórtices.

Para velocidades médias, o vórtice permanece em posição fixa relativamente ao obstáculo, mas passando determinados limites, o vórtice aumenta em dimensão e intensidade, separa-se do obstáculo e continua a jusante levado pelo fluido.

Os medidores de vórtices são usados principalmente para líquidos leves, podendo ser usados para vapores e gases, sendo necessário um número de Reynolds para o escoamento igual ou superior a 10^4 , sendo o fluxo máximo limitado por problemas de cavitação, devendo uma pressão mínima ser mantida.

A separação da camada limite e formação de vórtices são descritas por Kármán e Rubach (1912) e por Fage e Johansen (1927), segundo Goldstein (1965), num fluxo ao redor de uma placa plana, por Schlichting (1968), num fluxo ao redor de um cilindro e mais recentemente por Zhang e Ko (1996) e Achenbach e Heineck (1981), entre outros.

O número de Strouhal, S_r , uma constante usada para o estudo de fenômenos oscilatórios, aplica-se também à frequência de sucessão de turbilhões, sendo a frequência diretamente proporcional à velocidade do fluido.

O n° de Strouhal para um escoamento ao redor de uma placa plana é definido por:

$$S_r = \frac{n \cdot b}{V} \quad (1)$$

onde :

- n = frequência do escoamento, em Hz
- b = projeção da largura da pá, em m
- V = velocidade média do escoamento, em m/s.

Segundo Kármán e Rubach (1912), de forma idealizada, ocorre uma dupla linha de vórtices alternados e em sentidos opostos, sendo h a distância entre as linhas, a a distância entre dois vórtices consecutivos numa linha e b a projeção da largura da placa plana, de acordo com a fig. 1, sendo $h/a = 0,30$ $a/b = 5,6$ e $S_r = 0,144$, para $Re_b = 2 \times 10^3$, havendo um aumento de S_r para um acréscimo de Re_b .

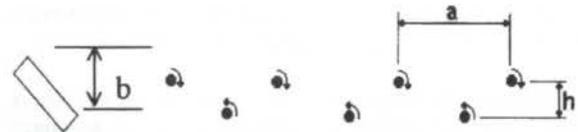


Fig. 1 - Desenvolvimento teórico dos vórtices

Fage e Johansen (1927), obtiveram para o escoamento ao redor de uma placa plana, com $\alpha = 90^\circ$, que h/a cresce de 0,25 na distância $5b$ a jusante da placa até 0,38 em $10b$ e 0,52 em $20b$, $S_r = 0,146$ e $a/b = 5,25$ para Reynolds da ordem de 2×10^3 .

Baseado no n° de Strouhal para o n° de Reynolds, Re_b , do escoamento estudado, procurou-se determinar a frequência da sucessão de vórtices ao redor de uma placa plana e a caracterização da geometria dos vórtices.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A técnica de Velocimetria Laser Doppler é não-intrusiva. No caso específico de Mecânica dos Fluidos esta característica é

fundamental, visto que se deseja a menor interferência possível da instrumentação na investigação dos fenômenos.

O efeito Doppler é a interação entre uma partícula em movimento e uma onda eletromagnética. Basicamente relaciona-se a frequência do laser com a frequência espalhada, decorrente da passagem de uma partícula pelo feixe. A diferença entre as duas frequências é a frequência Doppler, variável a ser relacionada com a velocidade.

A determinação do campo de velocidades e da frequência dos vórtices foi realizada numa bancada de calibração de medidores de fluxo líquido. A bancada possui um circuito fechado para circulação de água através de uma bomba centrífuga.

Foi colocada uma placa plana de 3mm de espessura, 18mm de largura e 48mm de comprimento, no interior de um tubo de acrílico de 52mm de diâmetro. A placa foi posicionada horizontalmente, com um ângulo de ataque de 0°, 45° e 90°, em relação à direção axial do tubo.

O escoamento ao redor da placa plana foi de água a 20°C numa vazão de $3.13 \text{ kg/s} \pm 2.56\%$, Re_D de $7,6 \times 10^4$ (Re_b de $2,6 \times 10^4$ para ângulo de ataque de 90°) e velocidade média de 1,47 m/s.

Para escolha das frequências a serem testadas no experimento, adotou-se um número de S_r de 0,148, igual ao Reynolds médio do escoamento estudado por Fage e Johansen (1927).

Substituindo-se estes dados na eq.1, chegou-se às frequências de sucessão dos vórtices de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Frequências de vórtices (n) em função do ângulo de ataque (α) e da projeção da largura da placa (b)

α (°)	b (mm)	f (Hz)
0	4,5	48
45	12,7	17
90	18,0	12

Decidiu-se trabalhar no experimento com frequências múltiplas de 6Hz, em vista dos dados obtidos na tabela 1.

Para determinação do campo de velocidades e da frequência do escoamento foram utilizados, conforme fig. 2, os seguintes equipamentos:

Laser Doppler Anemômetro (LDA) → detecta a presença de partículas contidas na água, as quais têm a mesma velocidade do escoamento;

Gerador de funções → para aplicação de funções triangulares, senoidais ou quadradas, variando-se a frequência de 6Hz a 96Hz, de 6 em 6Hz.

Analizador de velocidade de fluxo (FVA) → transmite os dados adquiridos no experimento a um programa de computador e ao osciloscópio;

Osciloscópio → serve para monitorar a presença do efeito Doppler, a frequência da onda produzida no gerador de funções e a atuação do encoder;

Encoder na frequência de 1MHz → serve para interromper o envio do sinal da fotomultiplicadora do laser, num período fixo, função da frequência aplicada no gerador de funções. Entre duas interrupções sucessivas detecta-se a frequência dos vórtices

através do campo de velocidades de conjuntos bem definidos de partículas no período correspondente;

Microcomputador PC → plataforma que executa o programa *Floware* versão 3.2 (DANTEC, 1990), que permite adquirir, processar e apresentar os dados coletados.

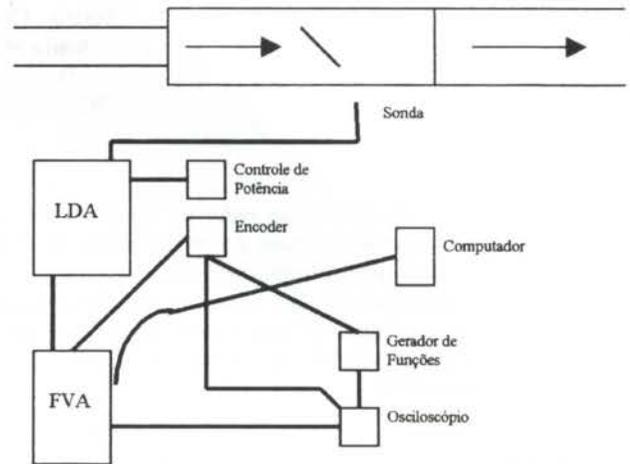


Figura 2- Sistema de medição com seção de testes

A fonte de laser utilizada é de íon argônio com 4W de potência. O raio laser é decomposto em dois pares de feixes, um com comprimento de onda de 514,5nm (verde) e outro com comprimento de onda de 488nm (azul). O comprimento focal da lente da sonda é de 400nm. Com este equipamento pode-se portanto, determinar o campo de velocidades do escoamento em duas dimensões, axial e circunferencial.

A localização correta da sonda é feita através de um posicionador com uma escala de deslocamento na direção axial e na direção radial da seção de testes.

O fluxo de luz espalhada devido à passagem de uma partícula na interseção de dois feixes de laser devidamente alinhados é coletado pela sonda. Uma fotomultiplicadora converte este fluxo de luz numa corrente elétrica. Variações nesta corrente elétrica são analisadas para a determinação da velocidade da partícula.

A fig.3 apresenta o esquema de funcionamento do encoder, onde :

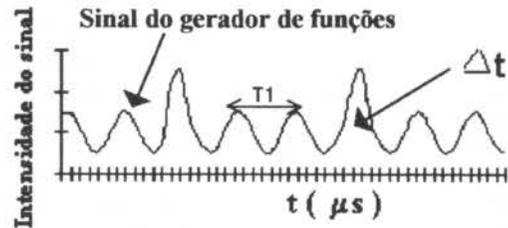


Figura 3 - Exemplo da atuação do encoder

Δt (s) = 1/1MHz é o intervalo de tempo em que é desativada a ação do laser;

n (Hz) = frequência da sucessão de vórtices;

T_1 (s) = 1/n (Hz) é o período de emissão dos pulsos do encoder.

Para cada frequência aplicada no gerador de funções, foi medida a velocidade do escoamento, como função do tempo de chegada das partículas, em seis posições na direção radial (Y), a uma distância de $X=15\text{mm}$ da placa plana, para ângulos de ataque α de 0° , 45° e 90° .

As figs. 4 e 5 apresentam as vistas superior e frontal da seção de testes.

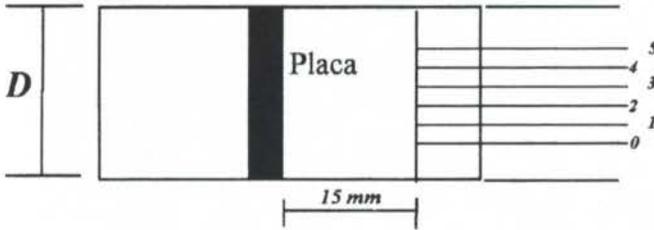


Figura 4 - Vista superior da seção de testes

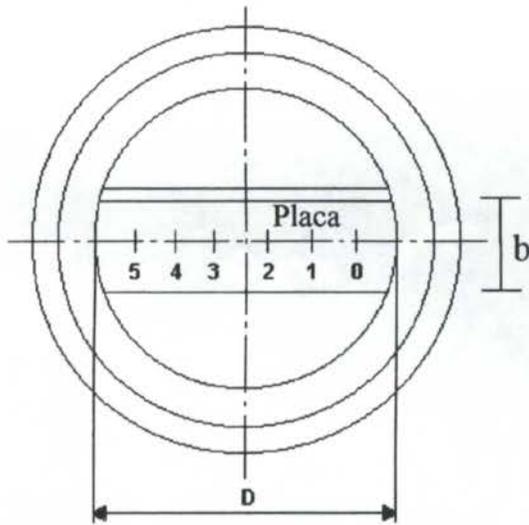


Figura 5 - Vista frontal da seção de testes

Também foram medidas as velocidades de 5 a 210mm da placa plana, com incremento de 5mm, nas posições 0 a 5, conforme figs. 4 e 5, com ângulo de ataque de 45° .

RESULTADOS

A presença de vórtices foi detectada através da medição da série temporal da componente $U(\text{m/s})$ no ponto localizado conforme fig.6, onde não há interferência da camada cisalhante.

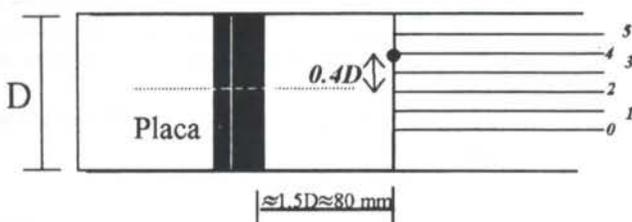


Figura 6 - Análise de um ponto do escoamento fora da camada cisalhante - $\alpha = 45^\circ$, $n = 24\text{Hz}$

A fig.7 mostra a série temporal de $U(\text{m/s})$ no ponto localizado de acordo com a fig.6.

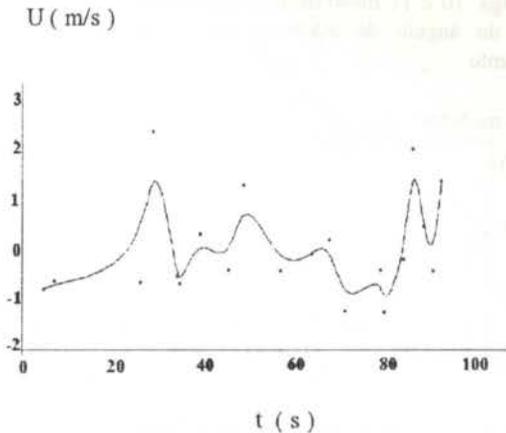


Figura 7 - Série temporal - Velocidade axial $U(\text{m/s})$ no ponto representado na figura 6.

A fig. 8 representa o comportamento do fluido, de 0,00s a 0,04s que corresponde ao período da função aplicada no gerador de funções, no mesmo ponto representado na fig.6.

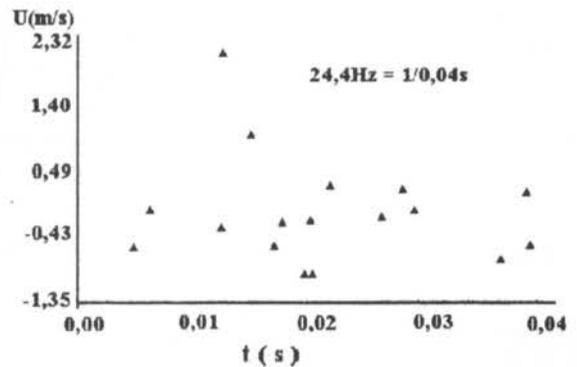


Figura 8 -Atuação do encoder no ponto representado na figura 6

A fig.9 mostra os vetores UV na posição $X=80\text{mm}$ ao longo da direção radial, conforme fig.6.

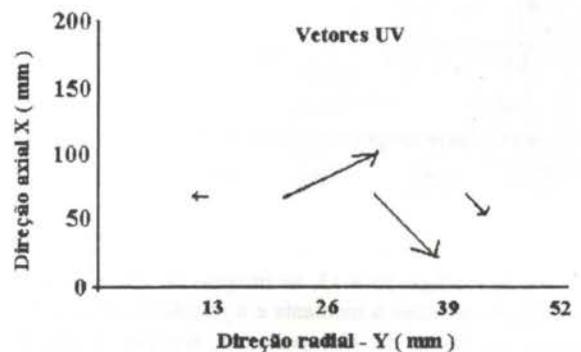


Figura 9 - Vetores UV em $X=80\text{mm}$ ao longo da direção radial

As figs. 10 e 11 mostram o comportamento dos vórtices em função do ângulo de ataque e da frequência aplicada ao escoamento.

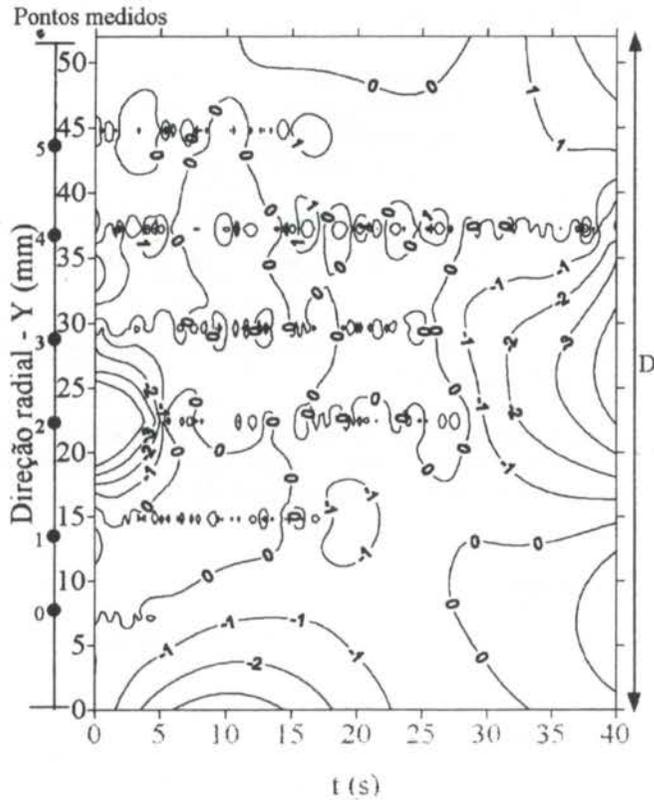


Figura 10 - $U = f(t, Y)$ para $X = 15\text{mm}$, $\alpha = 90^\circ$, $n = 18\text{Hz}$

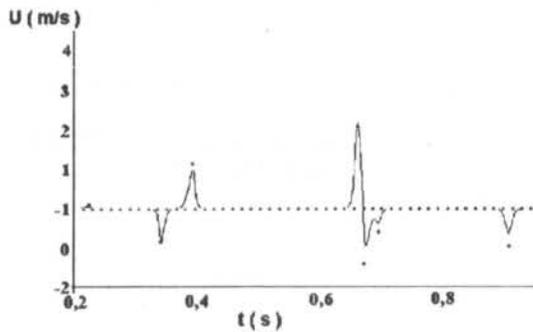


Figura 11 - Série temporal no ponto $X=15\text{mm}$, $\alpha = 0^\circ$ e $n = 66\text{Hz}$

Conforme figs. 12 e 13, as imagens do escoamento obtidas por câmara de vídeo a montante e a jusante da placa plana, com ângulo de ataque de 45° , permitem verificar a diferença de perturbação do escoamento.

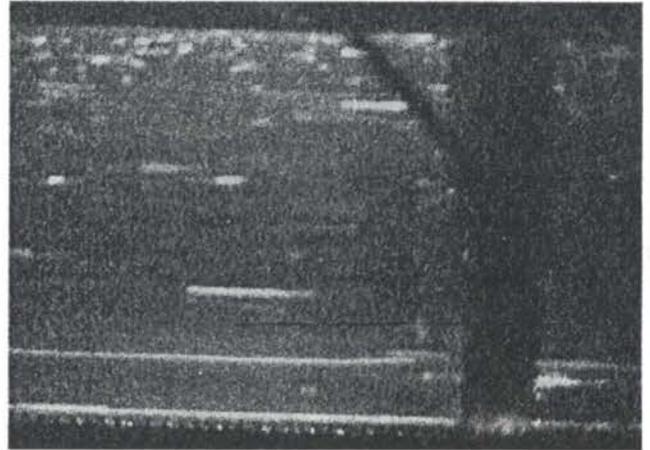


Figura 12 - Imagem do escoamento a montante da placa plana.

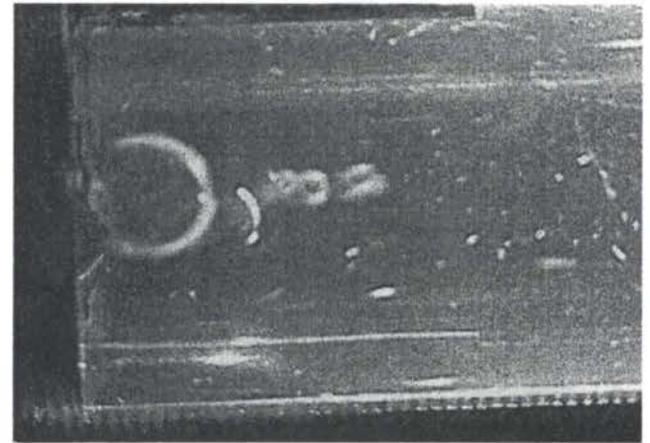


Figura 13 - Imagem do escoamento a jusante da placa plana

As figuras 14 e 15 mostram o desenvolvimento dos vórtices de $X = 0$ a 210mm (direção axial) e de $Y = 0$ a 52mm (direção radial) para um ângulo de ataque $\alpha = 45^\circ$ e frequência aplicada ao escoamento $n = 24\text{Hz}$.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pelas configurações dos vórtices nas figuras apresentadas e pelos dados em todos os pontos analisados, verifica-se a presença de vórtices em todas as frequências e ângulos de ataque utilizados.

Os vórtices desenvolveram-se ao longo de toda a seção de testes (210mm).

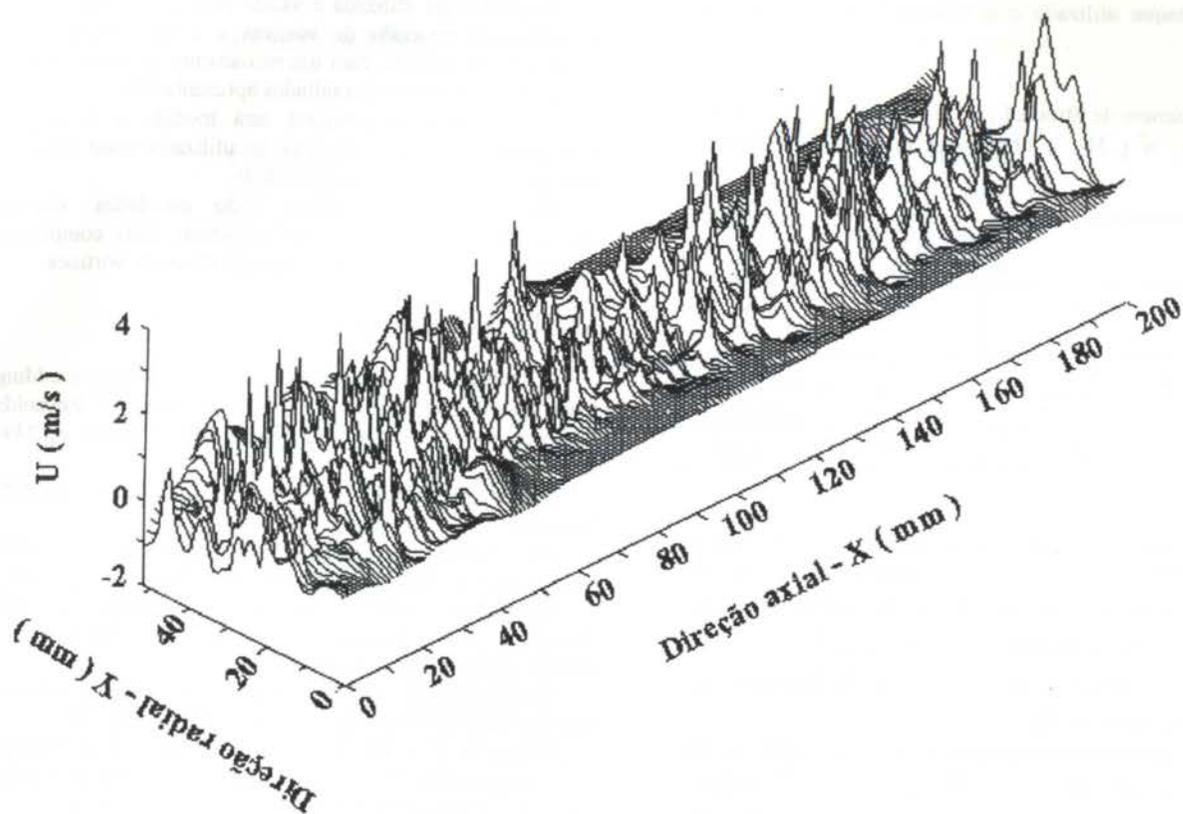


Figura 14 - Desenvolvimento dos vórtices $U = f(X, Y) - \alpha = 45^\circ$ e $n = 24\text{Hz}$

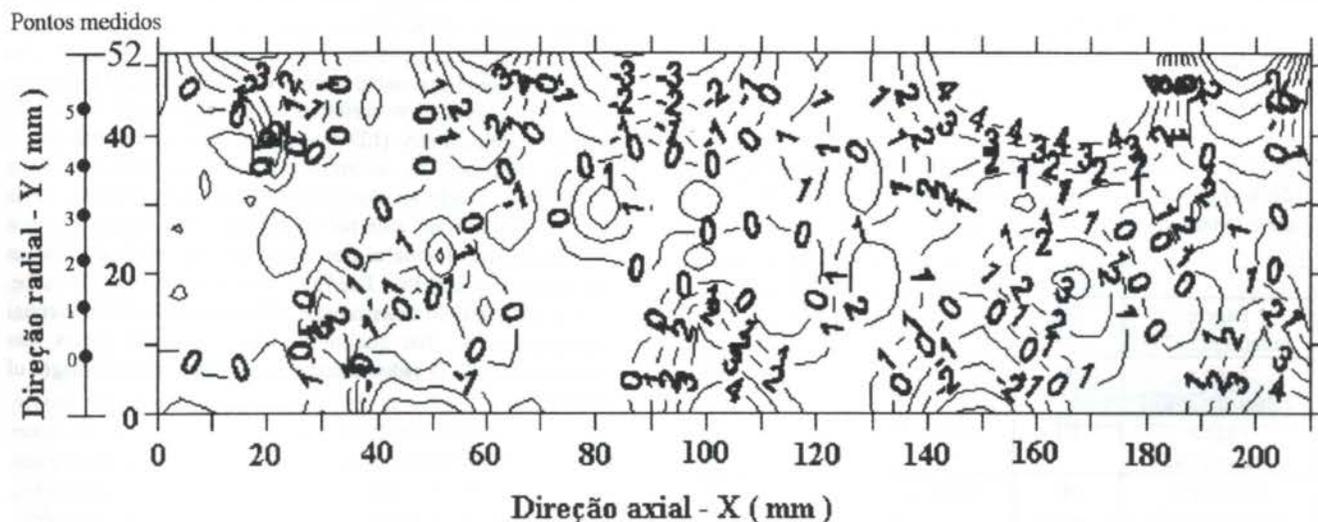


Figura 15 - Desenvolvimento dos vórtices - Vista Superior - $U = f(X, Y) - \alpha = 45^\circ$ e $n = 24\text{Hz}$

A tabela 2 apresenta as frequências obtidas experimentalmente onde predominam os vórtices, para cada ângulo de ataque utilizado e o correspondente número de Strouhal, S_r .

Tabela 2 - Número de Strouhal, S_r , e frequência da sucessão de vórtices, n (Hz), obtidos experimentalmente neste trabalho

Presente trabalho $Re_D = 7,6 \times 10^4$			
α (°)	n (Hz)	S_r	Re_b
0	66	0,202	$6,57 \times 10^3$
45	24	0,220	$1,85 \times 10^4$
90	18	0,207	$2,60 \times 10^4$

Entre os autores citados por Goldstein (1965), Fage e Johansen (1927), Tyler (1931) e Blenk, Fuchs, Liebers (1935) encontraram um número de S_r médio de 0,148, 0,158 e 0,18, respectivamente, para Re_b de 2×10^3 .

Segundo Goldstein (1965), o número de Strouhal, S_r , cresce com o número de Re_b .

A justificativa para a utilização neste experimento de um número de Reynolds, $Re_D = 7,6 \times 10^4$ ($Re_b = 2,6 \times 10^4$) se deve à necessidade de Re_D superior a 10^4 para utilização de medidores de vórtices para determinação da vazão de um escoamento.

A aplicação de outras frequências menores, próximas de 18Hz, 24Hz e 66Hz, permitirá refinar as faixas de frequências utilizadas para atingir-se um número de Strouhal, S_r , mais preciso.

A tabela 3 apresenta a relação a/b , que caracteriza a geometria dos vórtices na direção axial, comparada às obtidas por outros autores.

Tabela 3 - Comparação da geometria dos vórtices entre o trabalho apresentado (fig.15) e Kármán e Rubach (1912) e Fage e Johansen (1927) segundo Goldstein (1965)

	α (°)	a/b	X/b
Fage e Johansen(1927)	90	5,25	5
Fage e Johansen(1927)	90	5,25	10
Fage e Johansen(1927)	90	5,25	20
Kármán e Rubach (1912)	90	5,60	-
Presente trabalho	45	3,62	7,87 a 11,81 $X=100$ a 150 mm

Segundo Goldstein (1965), os valores experimentais de h/a são maiores que seu valor teórico (0,28) e crescem a jusante da placa, crescendo o valor de h e a permanecendo constante.

CONCLUSÕES

A metodologia utilizada é válida para a determinação da frequência da sucessão de vórtices e a caracterização da geometria dos vórtices, para um escoamento ao redor de uma placa plana, baseado nos resultados apresentados.

Na seqüência da pesquisa será medido o campo de velocidades num plano ortogonal ao utilizado neste trabalho, para que seja possível a medição de h .

Em trabalhos posteriores serão estudados vórtices produzidos por obstáculos de geometrias mais complexas, usados em medidores de fluxo tipo geradores de vórtices.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achenbach, E., e Heinecke, E., 1981, "On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 ", *J.Fluid Mech.*, Vol.109, pp.239-251.

Dantec Elektronik, 1990, "Floware User's Guide", Denmark.

De Carlo, J.P., 1984, "Fundamentals of flow measurements", Instrument Society, New York, pp.143 - 148.

Goldstein, S., 1965, "Modern Developments in Fluid Dynamics", Dover Publications Inc., New York, Vol.I, pp.36-40 e pp. 88-89 e Vol.II, pp.418-440

Schlichting, H., 1968, "Boundary Layer Theory, 6th ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp. 44 -47.

Zhang, H. L., e Ko, N.W.M., 1996, "Numerical Analysis of incompressible flow over smooth and grooved circular cylinders", *Computers & Fluids*, Vol.25, nº3, pp.263-281.

ABSTRACT

The flow around an obstacle happens with the appearance of a wake of swept vortex in position with a frequency that depends on the average flux. Determining this frequency is rather simple. The perfect characterization of the vortex geometry in time, however, has not been a trivial work. The higher Reynold's number corresponds the higher instability and vortex geometry variation. This work uses the Laser Doppler Velocimetry (LDV) coupled to a time synchronizer system (encoder) to determine the vortex dimensions. The synchronizer is able to recognize Doppler signals up to 1 MHz and works with an external adjustable reset signal. The test section is part of a water flowmeter calibration rig that has an uncertainty of $\pm 0,1\%$. The LDV used consists of a 2D probe, allowing flow field determination for axial and circumferential components. So that qualitative analysis of the vortex was performed, a CCD video camera was used to record images of the flow.