



VISUALIZAÇÃO DE FLUXO EM CORPOS SUBMERSOS COM TÉCNICA DE INJEÇÃO DE CORANTES

Jorge Villar Alé

Diego Saliba Dias (*)

Ricardo de Marsillac Peña (*)

Christian Cordeiro (*)

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica

Laboratório de Sistemas Fluido-Mecânicos -LSFM (*) Bolsistas do LSFM.

Avenida Ipiranga 6681 - Caixa Postal 1429 - Porto Alegre, RS - Brasil

Resumo. Neste trabalho apresentam-se resultados experimentais, obtidos no Laboratório de Sistemas Fluido Mecânicos (LSFM-PUCRS), da visualização de fluxo em corpos submersos, utilizando-se um canal hidráulico e técnicas de injeção de corantes. Os resultados mostram diferentes tipos de geometrias, submetidas a escoamento laminar, observando-se o campo de escoamento e as trajetórias das linhas de corrente. São descritas, genericamente, a metodologia utilizada e as técnicas de registro de imagens e processamento digital das mesmas para uma melhor visualização e análise de resultados.

Palavras-chave: visualização de fluxo, escoamentos externos.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de visualização de fluxo possibilitam estudar o comportamento dos fluidos em diferentes regimes de escoamento seja numa corrente livre, em condutos fechados ou sob corpos submersos. Tais técnicas permitiram contribuições significativas nas áreas de mecânica dos fluidos e aerodinâmica. Leonardo da Vinci (1425-1519) mostrou os primeiros desenhos de vórtices, baseado em sua observação. Os fenômenos de escoamento laminar e turbulento foram estudados por Osborne Reynolds (1842-1919), visualizando o fluxo com injeção de corantes. Ernest Mach (1838-1916), utilizou técnicas de visualização para mostrar ondas de choque em torno de um projétil. Na área de aerodinâmica, Ludwig Prandtl (1875-1953) reforçou suas contribuições da teoria da sustentação utilizando técnicas de visualização. A formação de recirculação de fluxo, emissão de vórtices e fenômenos de estol estático e dinâmico, têm sido observados com diferentes técnicas de visualização de fluxo. Uma ampla revisão de tais técnicas é publicada pela Japan Society of Mechanical Engineers (JSME, 1988). Uma classificação geral inclui técnicas de traçado de partículas, injeção de corantes, métodos de fios, métodos que utilizam reações químicas, métodos ópticos e métodos de trajetória de partículas com controle elétrico.

As técnicas de visualização fornecem, principalmente, uma idéia qualitativa do fenômeno e a interpretação das observações requer uma delicada análise, com prévia experiência no assunto. Torna-se ainda mais poderosa quando é utilizado em conjunto com alguma técnica que permite obter resultados quantitativos do fenômeno. Os princípios básicos desses métodos se baseiam na observação da trajetória de partículas, injeção de corantes, técnicas de emissão de fumaça e indicadores de fios para observação da trajetória do fluxo. Também pode ser utilizado para visualização, o espalhamento da luz por pequenas partículas sólidas introduzidas na corrente, ou por variação da massa específica de um fluido compressível, ou pela refração da luz por um filamento ou partículas de fluido com diferentes índices de refração introduzidos na corrente.

2. METODOLOGIA

No presente trabalho foram seguidas as seguintes etapas: a) projeto do canal hidráulico; b) testes com injeção de corantes em canal hidráulico; c) registro de imagens com câmara de vídeo e equipamento fotográfico; d) reprodução de imagens em vídeo; e) estudo preliminar das imagens em tela de TV; f) reprodução fotográfica de imagens visualizadas; g) digitalização de imagens fotográficas e de vídeo; h) tratamento de imagens com software apropriados. O trabalho faz parte de um projeto (Alé, 1996), desenvolvido no Laboratório de Sistemas Fluido-Mecânicos da PUCRS. Para observação dos fenômenos, utiliza-se um canal hidráulico desenvolvido no laboratório com técnica de injeção de corantes. Esta técnica é uma das mais simples, econômicas e efetivas para visualização de fluxo em corpos submersos. O método de Hele-Shaw é o mais apropriado para tal sistema. As imagens, assim visualizadas, são registradas. Duas metodologias de registro e tratamento de imagens são adotadas: o registro fotográfico e registro videográfico.

2.1 Captação Fotográfica de Imagens

O registro fotográfico com câmera convencional permite obter imagens que, uma vez reveladas, são digitalizadas através de um scanner de mesa fazendo-se, assim, uma análise computacional com software apropriado. Com isto, pode-se estudar detalhes do escoamento capturando regiões de fluxo que dificilmente seriam observadas com metodologias convencionais. A disponibilidade no mercado internacional de câmeras fotográficas digitais, conectadas diretamente a uma porta serial do computador é uma realidade. O custo de um equipamento profissional desta natureza, porém, tornaria inviável o projeto apresentado. Os testes são realizados com a câmera fotográfica direcionada na região onde se encontra o modelo. Para uma ótima visualização (Clayton e Massey, 1967), recomenda-se um feixe de luz perpendicular ao plano da lente fotográfica. Em nosso caso, várias experiências foram realizadas procurando a melhor forma de iluminação. Utilizou-se uma câmera fotográfica, de 35mm com objetiva normal e distância focal de 50mm e uma objetiva macro-zoom com filme de alta sensibilidade.

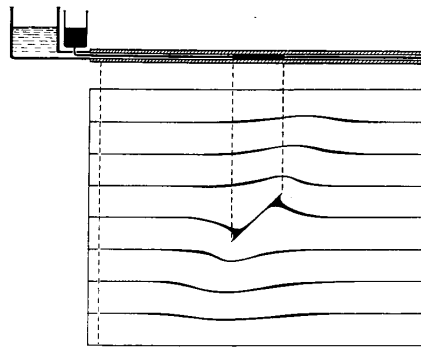
2.2 Testes com registro Vídeo-Gráfico

A outra metodologia adotada é o estudo das imagens registradas com câmera de vídeo, permitindo uma análise depurada dos efeitos de congelamento de imagens e seguimento do fluido, com velocidades reduzidas (Winkelmann e Tsao, 1985). O tratamento digital destas imagens facilita o estudo e análise da informação visual captada pela câmera (Nagib et al., 1978). O equipamento de aquisição de imagens utilizado é o mais econômico (placa vídeo blaster), convertendo a imagem fixa (quadro) gravada pela câmera de vídeo, num conjunto de

pontos que podem ser armazenados digitalmente, processados e exibidos num monitor de computador. Os registros da visualização foram realizados com uma câmara de vídeo VHS Camcorder, com objetiva com distância focal de 4.2 a 50.4mm. A câmara dispõe de zoom de 12:1, com controle automático de íris e controle de macro. Para técnicas de gravação e reprodução do registro das imagens usou-se um vídeo-cassete 4 cabeças e um TV em cores com tela de 27 polegadas.

3. EQUACIONAMENTO DO CANAL

Para a visualização de fluxo é injetado corante, colocando-se o corpo preso entre as duas placas. Tal tipo de canal, apresentado na Fig.1, é conhecido como dispositivo de Hele-Shaw. O escoamento no canal hidráulico pode ser considerado como um escoamento laminar de um fluido viscoso e incompressível, em regime permanente e sob efeito do campo gravitacional. As duas placas de vidro podem ser consideradas como duas paredes paralelas próximas separadas por uma distância $2a$. Considera-se o eixo z normal às paredes. As equações que governam este tipo de escoamento (Becerril, 1960) são apresentadas a seguir.



Fonte: (Becerril, 1960)

Figura 1 - Dispositivo de Hele-Shaw

A equação de Navier Stokes para regime permanente é dada por:

$$(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla\left(gh + \frac{p}{\rho}\right) + \nu\nabla^2\vec{v} \quad (1)$$

Sendo o vetor velocidade $V(x,y)$, p a pressão, ρ a massa específica do fluido, ν a viscosidade cinemática, h a altura e g a aceleração da gravidade, a expressão (1) pode ser escrita nas suas componentes como:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z}(p + \gamma h) \quad (2.3)$$

A velocidade nas fronteiras é nula e, para uma dada vazão, o gradiente transversal da velocidade é tanto maior quanto menor for a separação das fronteiras. Se as paredes estão muito próximas, o gradiente do vetor velocidade com respeito ao eixo z é tão grande que, em comparação com este, podem ser desprezíveis os gradientes nas direções x e y . Desta forma,

podem ser desconsiderados os termos: $\partial u/\partial x = \partial u/\partial y = \partial v/\partial x = \partial v/\partial y = 0$, assim como suas respectivas derivadas segundas. Com tal simplificação e incluindo o peso específico (γ) e a viscosidade absoluta (μ) resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(p + \gamma h) = 0 \quad (3.3)$$

o termo $(p + \gamma h)$ é independente da coordenada z e, desta forma, a integração das duas primeiras equações fornece:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) = \mu \frac{\partial u}{\partial z} + C_1(x, y) \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) = \mu \frac{\partial v}{\partial z} + C_2(x, y) \quad (4.2)$$

Por simetria, no plano médio definido em $z=0$, $\partial u/\partial z = \partial v/\partial z = 0$. Para satisfazer tal condição, as constantes devem ser nulas e portanto:

$$\frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) = \mu \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5.2)$$

Integrando as Eqs. (5.1) e (5.2) obtém-se:

$$u = \frac{z^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) + k_1(x, y) \quad (6.1)$$

$$v = \frac{z^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) + k_2(x, y) \quad (6.2)$$

Considerando-se as condições de contorno, a velocidade é nula nas superfícies sólidas (para $z=a$), com isso pode-se determinar as constantes:

$$k_1(x, y) = -\frac{a^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) \quad (7.1)$$

$$k_2(x, y) = -\frac{a^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) \quad (7.2)$$

e com elas determinar-se o perfil de velocidades, usando-se as expressões:

$$u = \frac{z^2 - a^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) \quad (8.1)$$

$$v = \frac{z^2 - a^2}{2\mu} \frac{\partial}{\partial y}(p + \gamma h) \quad (8.2)$$

As equações (8.1) e (8.2) fornecem uma distribuição parabólica da velocidade entre as paredes. A velocidade máxima ocorre no plano médio. Considerando-se a superfície parabólica, a velocidade média vale 2/3 da velocidade máxima e suas componentes V_x e V_y são definidas como:

$$V_x = -\frac{a^2}{3\mu} \frac{\partial}{\partial x} (p + \gamma h) \quad (9.1)$$

$$V_y = -\frac{a^2}{3\mu} \frac{\partial}{\partial y} (p + \gamma h) \quad (9.2)$$

Utilizando-se uma ferramenta computacional, CFD-RC, foi determinado o perfil de velocidades dentro do canal projetado no LFSM, representado na Fig.2 (a) e (b).

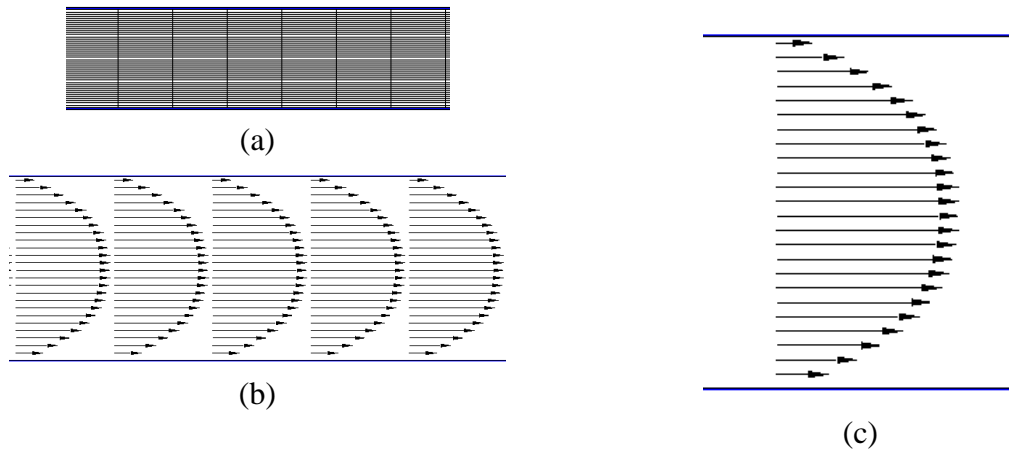


Figura 2 - Detalhe da malha (a) e do perfil de velocidades parabólico no canal (b) e (c).

Considerando-se o movimento das partículas num plano paralelo às paredes ($z=cte$), as componentes das velocidades mostram que trata-se de um escoamento irrotacional, uma vez que existe um potencial de velocidades dado por:

$$\phi = -\frac{(z^2 - a^2)(p + \gamma h)}{2\mu} \quad (10)$$

Sendo no centro do canal do escoamento dado por:

$$\phi = \frac{a^2(p + \gamma h)}{3\mu} \quad (11)$$

O campo de escoamento de maneira geral, é rotacional e definido como:

$$\Omega = -\frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial z} i + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial z} j \quad (12)$$

Para um observador olhando no sentido normal às paredes o movimento pareceria irrotacional. Com tal característica, é possível visualizar-se que o campo de escoamento sob corpos submersos é um escoamento irrotacional, utilizando fluidos viscosos, em nosso caso, água.

4. MONTAGEM DO CANAL HIDRÁULICO

No *Laboratório de Sistemas Fluido-Mecânicos (LSFM)*, foi montado um canal hidráulico permitindo realizar as experiências de visualização de fluxo. Dentro do canal foi inserido o dispositivo de Hele-Shaw. Detalhes desta fase do projeto são apresentados no relatório de Alé e Campana (1997). O modelo foi instalado entre duas placas paralelas de vidro. O escoamento do fluido neste estreito espaço é realizado por gravidade e a vazão é controlada através de uma válvula de registro. Injetando-se corante na entrada do canal, podem ser observadas as linhas de corrente correspondentes às características do escoamento potencial. Tal método é utilizado quando a velocidade é suficientemente pequena para que as forças de inércia sejam desprezíveis. Para tal, deve-se garantir que $(h/L)^2 < 1$, onde h é a separação entre placas e L o comprimento característico do modelo. Tal sistema deve ser introduzido no canal hidráulico com a finalidade de colocar o modelo a ser visualizado. O material do dispositivo é de acrílico e mangueira transparente. O elemento injetor de corantes também é incluído nesta fase do trabalho. A Fig.3(a) mostra uma vista superior do canal hidráulico observando-se no interior as placas de vidro. Também apresenta-se uma vista frontal do canal (b) e um detalhe do injetor de corantes (c), observando-se o filete de fluido emitido em cada perfuração do injetor. Os modelos que foram utilizados para visualização das linhas de fluxo são mostrados na Fig.4.

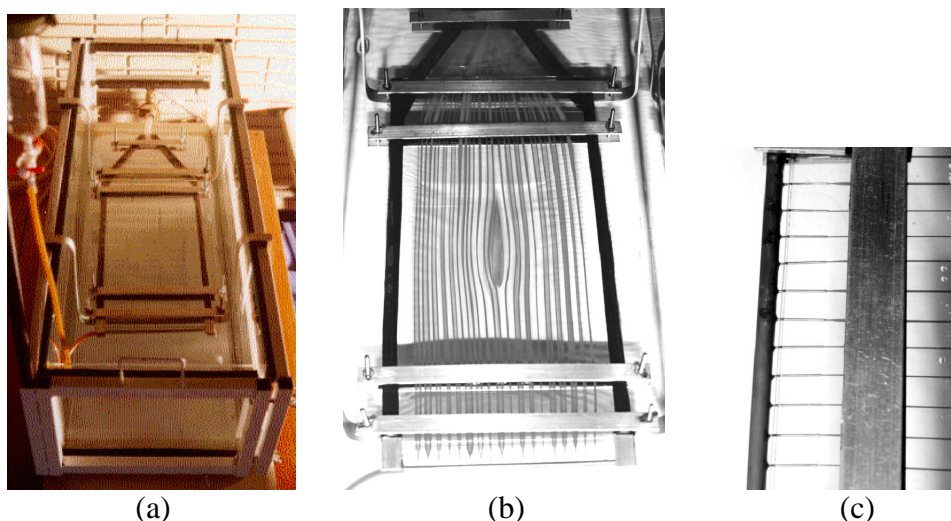


Figura 3 - Vista superior do canal hidráulico e detalhe do injetor.

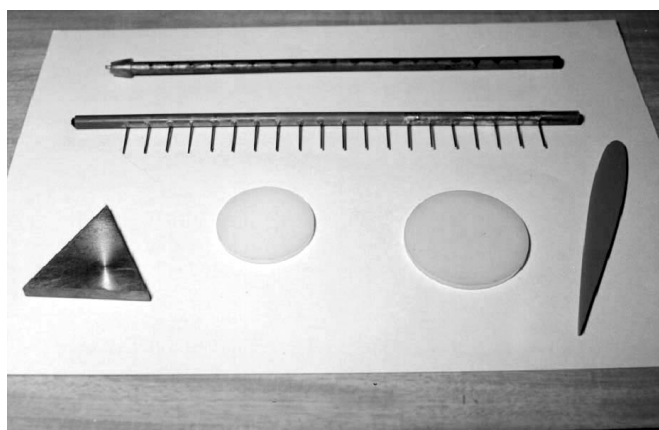


Figura 4 - Modelos e injetor de corantes utilizados

5. RESULTADOS DOS TESTES COM OS MODELOS

Foram realizados testes preliminares com diferentes modelos, estudando-se as melhores posições de iluminação que permitissem uma adequada visualização das linhas, para o posterior registro das imagens. Tais resultados foram apresentados por Alé (1998). Novos resultados são apresentados (Fig.5 a Fig.8), mostrando detalhes da visualização utilizando diferentes geometrias. A maioria dos testes foram realizados com velocidade de 2,5cm/s a 5,0cm/s e número de Reynolds variando em torno de 1000 a 4000. Na Fig. 5 mostra-se os resultados de visualização de uma corpo cilíndrico. A velocidade de escoamento foi em torno de 5,0cm/s, com número de Reynolds da ordem de 2700. Observa-se a boa qualidade das linhas de corrente e o filete que representa o ponto de estagnação.

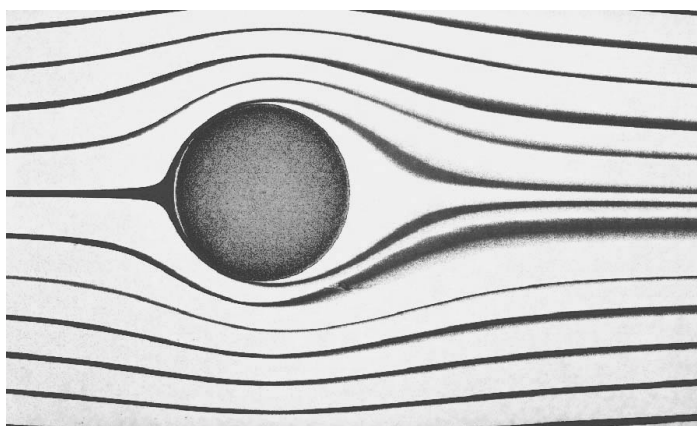


Figura 5 - Visualização de corpo cilíndrico.

A Fig.6 mostra a visualização do escoamento num perfil simétrico NACA 0012, com ângulo de ataque de zero grau, velocidade próxima dos 3,0cm/s e Reynolds de 3000. Devido às dificuldades em posicionar simetricamente o filete central do fluido, (próximo do ponto de estagnação) observa-se um ligeiro desvio das linhas de corrente que contornam a superfície do aerofólio.

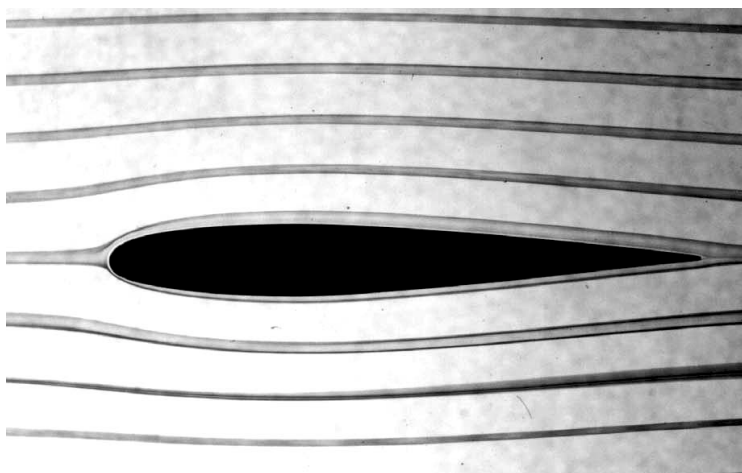


Figura 6 - Visualização de perfil aerodinâmico

A Fig. 7 mostra a visualização para um ângulo de ataque de 18° , utilizando o mesmo perfil aerodinâmico. Utilizou-se uma velocidade média de $4,0\text{cm/s}$ no canal, representando um número de Reynolds da ordem de 4000.

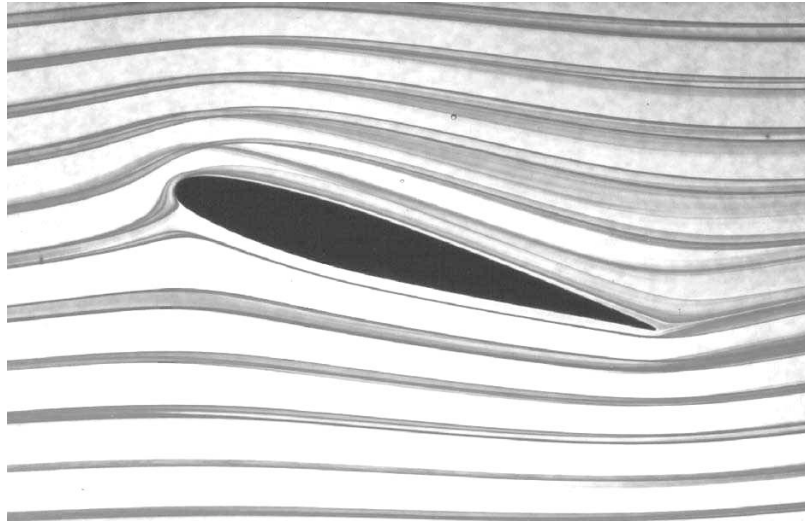


Figura 7 - Visualização de perfil aerodinâmico com ângulo de inclinação.

O escoamento sobre um perfil equilátero é apresentado na Fig.8. A velocidade de corrente livre é em torno de $4,5\text{cm/s}$ correspondendo a um número de Reynolds de 2400. Observa-se com nitidez a simetria formada pelas linhas de corrente e a simetria da recirculação do fluido, na parte posterior do modelo.

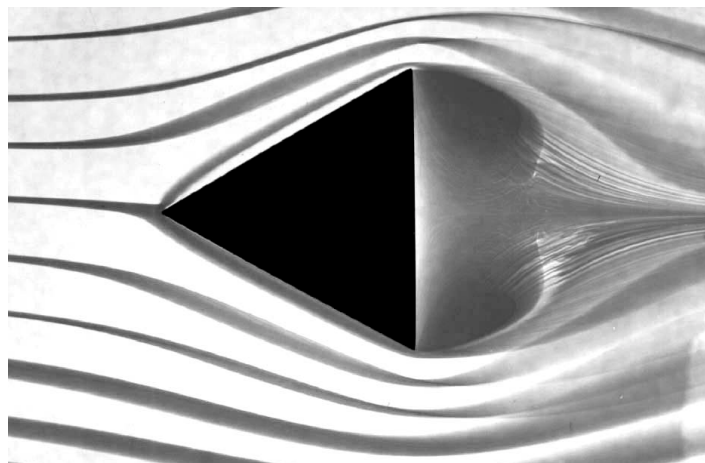


Figura 8. Visualização de fluxo em peça em corpo triangular

6. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos utilizando diversas geometrias permitiram a visualização de fluxo. Algumas dificuldades para realização dos testes ocorreram devido a sensibilidade necessária para conseguir posicionar corretamente o injetor de corante no intertício das paredes formadas pelas chapas de vidro. Tornou-se necessário aperfeiçoar o injetor de corante, uma vez que as linhas de corrente emitidas no bocal de entrada do injetor se deformavam apresentando-se achatadas, prejudicando a visualização do fluxo. Verificou-se que pequenas bolhas de ar têm-se alocados nas paredes das chapas de vidro e na superfície dos modelos, devendo ser eliminadas para uma melhor visualização. O canal hidráulico foi melhorado para facilitar a visualização, modificando o injetor e diminuindo-se a espessura entre as placas de vidro. Os resultados obtidos encontram-se a disposição na home-page do LSFM (www.em.pucrs.br/~lsfm/).

Agradecimentos

Agradecemos à FAPERGS Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul, pelo financiamento do projeto. Agradecemos também o auxílio dos alunos bolsistas e profissionais da PUCRS que colaboraram no presente projeto principalmente, ao Eng. Carlos Schossler, ao Prof. Nelson Rosa e aos técnicos Carlos Alberto Franco da Cunha, Luiz Carlos Silveria e Vanderlei Ochôa.

REFERÊNCIAS

- Alé J.V., 1996 *Digitalização de Imagens na Visualização de Fluxo do escoamento em Corpos Estacionários ou em Movimentos Oscilatórios*, Projeto ARD - Fapergs.
- Alé J.V.; Campana L.F. 1997, *Digitalização de Imagens na Visualização de Fluxo.*, Projeto Fapergs ARD, Relatório 97/2.
- Alé J.V.; 1998, *Visualização de Fluxo em Canal Hidráulico com Técnica de Injeção de Corantes.*, Congreso Chileno de Ingenieria Mecânica., vol.1. pp. 1033-1037.
- Becerril E., 1960, *Hidrodinamica*, Editorial Dossat, SA, Madrid.
- Clayton , B.R., and Massey, B.S., 1967 *Flow Visualisation in Water: A review of Technique*, Journal os Scientifics Instruments, Vol.44, Jan, pp.2-11.
- JSME, 1988, *Visualized Flow: Fluid Motion in Basic Engineering Situations Revealed by flow visualization*. Compiled by The Japan Society of Mechanical Engineers. Pergamon Press, 1988. 137pag.
- Nagib, H., Corke, T., Helland, K., and Way, J., 1978, *Computer Analysis of Flow Visualizations Records Obtained by Smoke-Wire Technique*. Proceedeings of the Dynamic flow Conference, Marseille, France, pp.567-582.
- Winkelmann, A.E. and Tsao, C.P., 1985 *A color Video Display Technique for Flowfield Surveys*, AIAA Journal, Vol. 23, Sep. pp.1381-1386.

FLOW VISUALIZATION AROUND BODY SURFACES WITH DYE INJECTION TECHNIQUES

Abstract. *In this present work are presented experimental results of flow field visualization around submerged bodies using a hydraulic channel with injection streak line method in the Fluid Mechanics Systems Laboratory (LSFM). The results show the flow field and streamlines around different bodies.*

Key-words: Flow visualization, external flows