

VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM BANCOS DE TUBOS

Cláudio Rodrigues Olinto

Univesidade Federal do Rio Grande do Sul¹
Rua Sarmento Leite, 425 - Porto Alegre - RS
dfsacro@furg.br

Luiz Augusto Magalhães Endres

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH
Rua Sarmento Leite, 425 - Porto Alegre - RS
endres@iph.ufrgs.br

Sérgio Viçosa Möller

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PROMEC
svmoller@ufrgs.br

resumo. O escoamento turbulento através de bancos de tubos está presente em um grande número de aplicações de engenharia, especialmente em tubos e barras de trocadores de calor. A forma como o escoamento ocorre afeta os mecanismos de troca de calor e o carregamento estático e dinâmico sobre as estruturas sólidas. O fluido, ao transpor as primeiras fileiras de bancos de tubos, pode sofrer mudanças não estacionárias no seu padrão de escoamento, que se propagam para as fileiras mais interiores. A visualização é uma ferramenta muito importante na compreensão e análise de escoamentos, servindo como instrumento auxiliar em trabalhos de medições das grandezas envolvidas e simulações numéricas. Neste trabalho são apresentadas visualizações de escoamentos sobre arranjos de tubos com disposição quadrangular, realizado em um canal de água, para números de Reynolds na faixa de $1,2 \times 10^4$ a $5,3 \times 10^4$. A técnica de visualização empregada foi a injeção de um traçador diretamente no escoamento, em pontos convenientemente escolhidos e o registro em imagens digitais. A partir dessas visualizações pôde-se identificar, a partir de arranjos com duas fileiras de tubos, a presença de um padrão de escoamento fortemente transversal à sua direção principal e estudar sua propagação para as fileiras seguintes.

Palavras chave. bancos de tubos, escoamentos turbulentos, visualização de escoamento.

1. Introdução

Escoamentos de fluidos sobre conjuntos de cilindros estão presentes em muitas aplicações de engenharia. Dentre os casos mais comuns, podem ser citados: tubos de trocadores de calor, plataformas *offshore*, torres e linhas de transmissão de potência, grupos de chaminés, estacas de píeres e pontes, equipamentos de usinas nucleares, etc. Esses escoamentos estão associados ao aparecimento de cargas dinâmicas causadoras de vibrações, que, em geral, são amplificadas com o aumento da velocidade do fluido. Os escoamentos sobre arranjos de cilindros distinguem-se fenomenologicamente em função da disposição dos tubos. Arranjos com grandes distâncias entre os tubos desenvolvem cargas dinâmicas associadas com o processo de geração e desprendimento de vórtices em frequências definidas. Nos arranjos com pequenas distâncias, o escoamento é caracterizado por um amplo espectro de energia sem uma frequência definida, que está relacionado com as flutuações de pressão e periodicidades geradas principalmente nas primeiras fileiras de cilindros sujeitas ao escoamento.

Diversas técnicas de visualização de escoamento vêm sendo utilizadas no estudo de escoamentos turbulentos sobre arranjos de tubos. Summer et al. (1999) utilizaram técnicas de PIV (*Particle image velocimetry*) e injeção de tinta para visualizar o escoamento sobre arranjos de dois e três tubos. Williamson (1985) utilizou a técnica de injeção de fumaça em túnel de vento para visualizar os diversos modos de geração e desprendimento de vórtices sobre um par de corpos rombudos para diversos números de Reynolds. Le Gal et al. (1996) utilizaram fumaça de hidroxilas, gerada pela oxidação de um fio transversal ao escoamento, por onde circula uma corrente elétrica, para visualizar o comportamento coletivo das esteiras a jusante de uma fileira de tubos. Guillaume e LaRue (1999) utilizaram, para visualizar o regime de escoamento biestável em arranjo de dois e três tubos, a injeção de fumaça, iluminada por um plano de luz laser. Essa também foi a técnica utilizada por Zhang e Zhou (2001) para estudar o efeito do espaçamento desigual em arranjos de três cilindros posicionados lado a lado sobre o desprendimento de vórtices e por Xu et al. (2003), para estudar o efeito do número de Reynolds sobre a estrutura de escoamento atrás de dois tubos posicionados lado a lado. Hiramoto e Higuchi (2003) utilizaram a técnica de bolhas de hidrogênio para visualizar o escoamento e DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*) para realizar medições no campo de velocidades no estudo de desprendimento de vórtices atrás de um par de cilindros não paralelos em relação ao escoamento. Alam et al. (2003) também utilizaram a técnica de bolhas de hidrogênio em seus estudos de escoamentos sobre arranjos de tubos. Em estudos de bancos de tubos, uma técnica

¹ Atualmente na Fundação Universidade Federal do Rio Grande -FURG

bastante utilizada para a visualização do escoamento no interior do banco é a injeção de tinta diretamente no escoamento. Esta é a técnica utilizada em Ziada e Oengören (1992 e 1993) Ziada (2000), Oengören e Ziada (1992, 1998) e Ziada et al. (1989).

Indrusiak (2004) estudou a aplicação de transformadas de ondaletas para a interpretação de escoamentos turbulentos. Durante a aquisição de séries de velocidades, obtidas por anemometria de fio quente, no interior de um banco de tubos com arranjo quadrangular e razão de espaçamento de 1,26, foi identificado, após a decomposição dos sinais em bandas de frequências, um regime de escoamento não estacionário, diferente do esperado. Esse escoamento não estacionário apresentou características semelhantes ao que ocorre na esteira do escoamento sobre certas geometrias de dois cilindros posicionados lado a lado, denominado biestável, onde dois regimes metaestáveis são estabelecidos, trocando aleatoriamente entre si. Olinto et al. (2004) estudaram experimentalmente os escoamentos sobre dois tubos posicionados lado-a-lado e relacionaram o fenômeno biestável com as instabilidades detectadas no interior de um banco de tubos com arranjo quadrangular e a mesma razão de espaçamento.

Neste trabalho são apresentados os resultados relativos a visualizações realizadas em um canal de água usando diferentes geometrias de tubos, com a finalidade de auxiliar na interpretação dos fenômenos observados por Indrusiak (2004) e Olinto et al. (2004).

2. Técnica experimental

Os experimentos foram realizados em um canal de água de circuito fechado, com superfície livre, pertencente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O canal permite controlar o nível da lâmina de água através de uma comporta posicionada na descarga e a vazão, através de um conjunto de válvulas na tubulação de alimentação. A seção transversal tem 500 mm x 500 mm e possui uma janela de vidro lateral que permite a visualização da região dos experimentos. O acompanhamento visual dos escoamentos estudados é feito pela injeção de um traçador a base de solução de permanganato de potássio, diretamente no escoamento, através de conjuntos de agulhas.

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma seção de testes construída em placas de acrílico transparente com 1 m de comprimento e seção transversal interna de 475 ± 1 mm de largura por 340 ± 1 mm de altura. Essa seção é instalada no interior canal de água, a fim de criar um escoamento uniforme. Como o canal é de superfície livre, a seção de testes de acrílico também possui a função de evitar os efeitos de oscilações e formação de ondas de superfície. Para reduzir os efeitos do descolamento da camada limite a partir das extremidades de montante da seção, as bordas das placas de acrílico foram chanfradas na forma de um perfil aerodinâmico suave. Durante os experimentos, o nível do canal é controlado para estar sempre acima da parede superior da seção de testes.

Antes dos experimentos com os tubos, o escoamento dentro da seção de testes de acrílico foi avaliado e constatado que o perfil de velocidades é suficientemente uniforme com pequenos efeitos gerados pelas bordas da seção.

A seção de testes de acrílico foi projetada para permitir a montagem de diversas configurações de tubos no seu interior, permitindo estudar diversas geometrias de arranjos de tubos. Os tubos são posicionados na direção vertical e fixados rigidamente por parafusos na parede superior da seção de testes. A razão de espaçamento utilizada para todos os experimentos é de 1,26, com incerteza de 0,5%. A Figura 1 mostra o esquema de montagem da seção com o banco de tubos completo no seu interior. Os tubos são confeccionados em PVC branco, com diâmetro de 75 mm. O tubo central é feito em acrílico transparente com o mesmo diâmetro e possui um espelho posicionado a 45° em relação ao eixo do tubo, a 170 mm de sua base (essa altura corresponde à altura média dos tubos na seção), conforme Fig. 2(a). Esse espelho permite a visualização do escoamento no interior da seção de testes, no plano vertical, entre o tubo que contém o espelho e o tubo imediatamente ao lado, na mesma fileira. Para permitir a visualização do escoamento é feita injeção de tinta por um orifício no tubo lateral ao tubo de acrílico, usando uma agulha, na altura média do tubo (Fig. 2(b)). Um outro esquema de injeção de tinta é mostrado na Figura 3, onde se pode observar o escoamento de aproximação e um conjunto de agulhas a montante da seção de testes. Neste sistema a injeção de tinta é feita a 60 mm abaixo da parede superior da seção de acrílico.

As visualizações do escoamento foram realizadas para diversas configurações, de maneira a estudar o comportamento do escoamento ao atravessar as fileiras do banco de tubos. Os números de Reynolds foram calculados com a velocidade média nas fendas. Essa por sua vez, foi calculada a partir da velocidade de aproximação, utilizando-se a conservação da massa. A injeção de tinta ocorreu de três formas: através do conjunto de agulhas mostrado na Fig. 3, que injeta a tinta a 60 mm abaixo da parede superior da seção de testes, na direção das fendas estreitas entre os tubos de cada fileira, através da agulha posicionada no interior do tubo vizinho ao tubo de acrílico (Fig. 2) e através de uma agulha móvel, que permite a injeção de tinta a 60 mm do fundo do canal, em qualquer posição desejada.

A Figura 4(a) mostra o detalhe do tubo lateral ao de acrílico visto através do espelho, para a geometria de dois tubos posicionados lado a lado. O detalhe de interesse é o círculo central, no qual se pode visualizar uma parte do tubo de PVC, onde está localizado o orifício para injeção de tinta no escoamento. Na figura, também podem ser vistos dois anéis externos concêntricos, que não são de interesse da visualização: o interior representa o reflexo do tubo ao penetrar na água e o exterior, a extremidade superior do tubo de acrílico. A Figura 4(b) mostra uma visualização típica da injeção de tinta vista através do espelho.

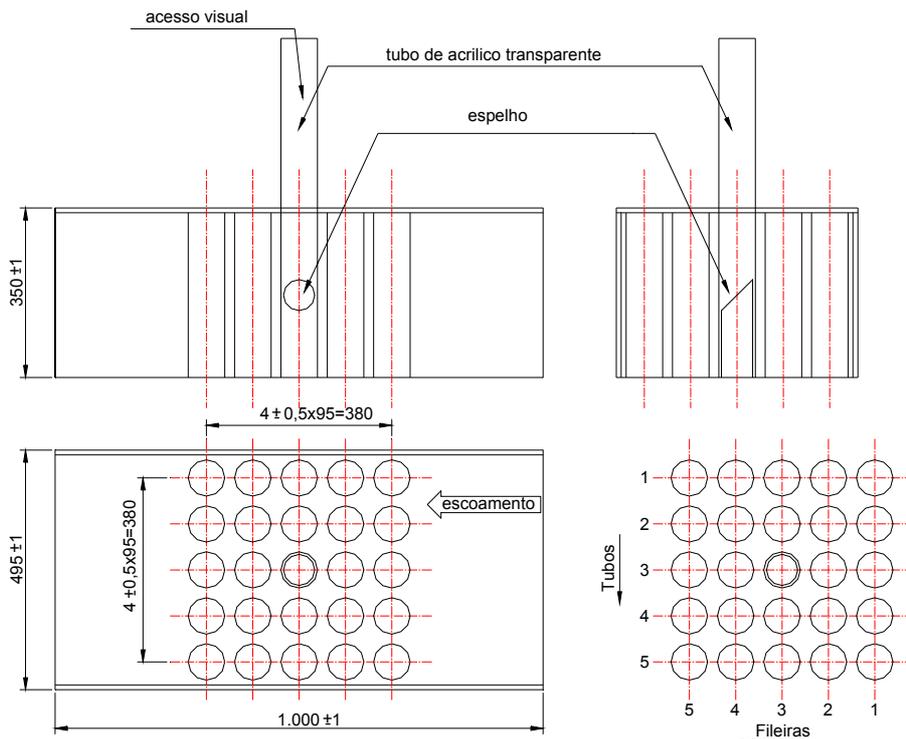


Figura 1. Esquema dimensional da seção de testes para visualização no canal de água (dimensões em mm).

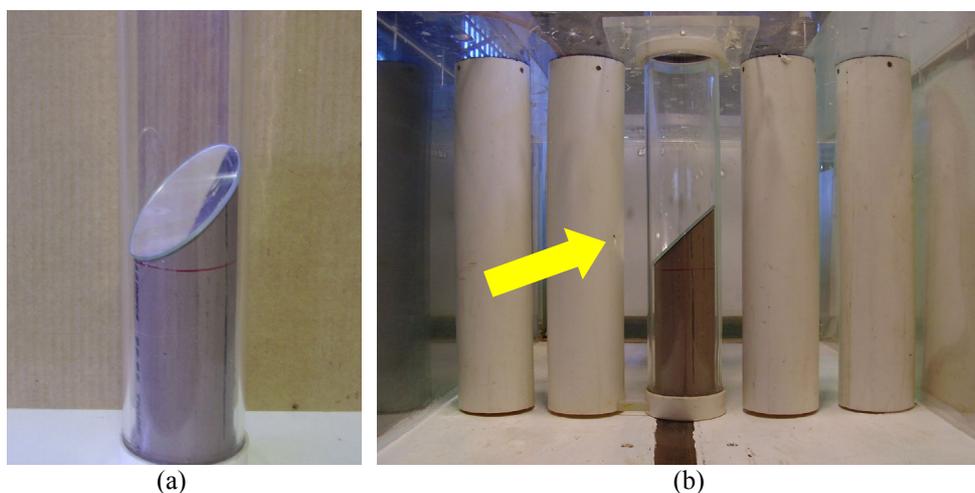


Figura 2. (a) Detalhe do tubo central, mostrando o posicionamento do espelho e (b) montagem do tubo de acrílico em um arranjo de uma fileira de tubos, vista do interior da seção de acrílico (vista de montante para jusante). A seta indica o ponto de injeção de tinta.

Os experimentos de visualização foram realizados com velocidades de aproximação variando entre 0,07 m/s e 0,22 m/s. Entre dois ensaios consecutivos o sistema de bombeamento é desligado e esperado o total esvaziamento do canal, para evitar que haja influência do padrão estabelecido em um ensaio sobre o outro. Para identificar cada um dos modos de escoamento, foram realizados tantos experimentos quantos necessários, já que a formação de cada padrão ocorre de forma aleatória.

Os registros das visualizações foram feitos através do uso de uma câmera digital Aiptek ligada diretamente a um micro computador portátil com resolução de até 640 x 480 pixels e através de uma máquina fotográfica Olympus modelo D-535 que gera fotos com 3,2 Mpixels e realiza filmagens com 15 quadros por segundo.

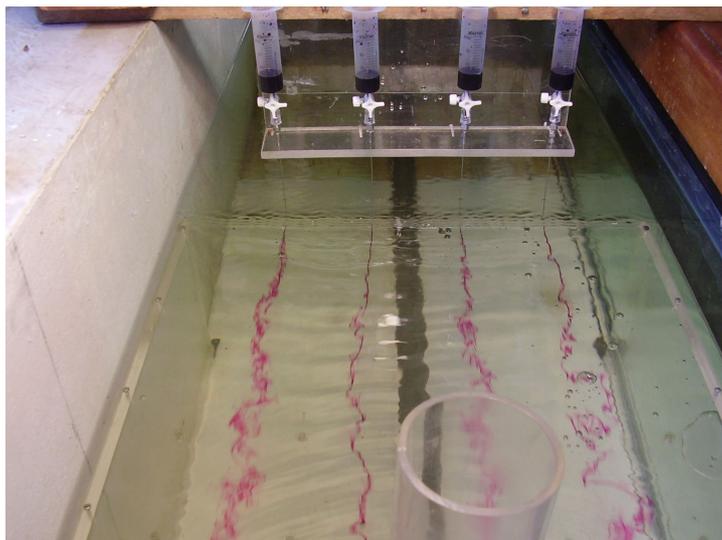


Figura 3. Detalhe da seção de testes de acrílico posicionada no interior do canal de água e do sistema de injeção de tinta por agulhas.

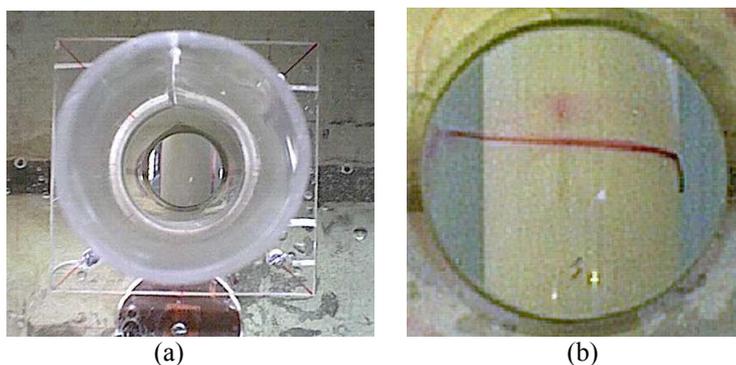


Figura 4. 3.14 - Visualização através do tubo de acrílico. O espelho reflete a imagem do tubo lateral, permitindo visualizar o interior do banco de tubos em uma projeção vertical.

3. Resultados

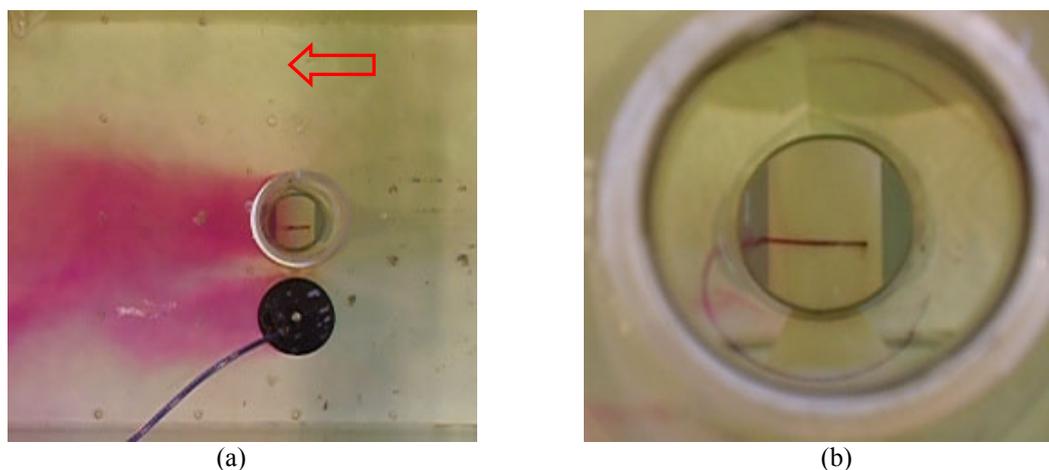


Figura 5. Visualização do escoamento sobre dois tubos posicionados lado a lado (a) mostrando a formação das esteiras larga e estreita e (b) detalhe do escoamento do filete de tinta injetado na fenda estreita entre os tubos, visto através do espelho no interior do tubo de acrílico.

3.1 Dois tubos

A Figura 5 mostra a visualização do escoamento sobre dois tubos no canal de água feita para um número de Reynolds de $1,2 \times 10^4$. Duas características importantes podem ser identificadas a partir das visualizações: a primeira é a presença do escoamento do jato desviado mostrando a formação de uma esteira larga e outra estreita (Fig. 5(a)). A segunda, que é vista através do espelho posicionado dentro do tubo de acrílico (Fig. 5(b)), é que o escoamento se desenvolve em um plano bidimensional horizontal, pois o filete de tinta liberado dentro da fenda estreita não sofre variação no plano vertical.

3.2 Uma fileira de tubos

Na Figura 6, é mostrada a visualização do escoamento através de uma fileira composta de 5 tubos. As letras A, B, C e D, que aparecem na Fig. 6(a), correspondem à seqüência de fendas estreitas entre os tubos da fileira (convenção adotada para todos os experimentos). O padrão de desvio das esteiras corresponde ao mesmo obtido em medições de pressão em um canal aerodinâmico (Olinto, 2004). Da Figura 6, também se pode concluir que o escoamento sobre a fileira de tubos mantém a característica bidimensional, conforme pode ser visto pelo alinhamento do filete de tinta, visto no espelho dentro do tubo de acrílico, com a direção principal do escoamento, bem como, pelo fato de existir um mesmo padrão de desvio das esteiras, próximo à parede superior e próximo ao fundo (Fig. 6(b)). Um segundo padrão é mostrado na Fig. 7, onde os jatos que emergem das fendas A, B e C fundem-se em uma única e o jato da fenda D segue alinhado com o escoamento principal. Os dois padrões de escoamento obtidos durante os experimentos ocorreram aleatoriamente.

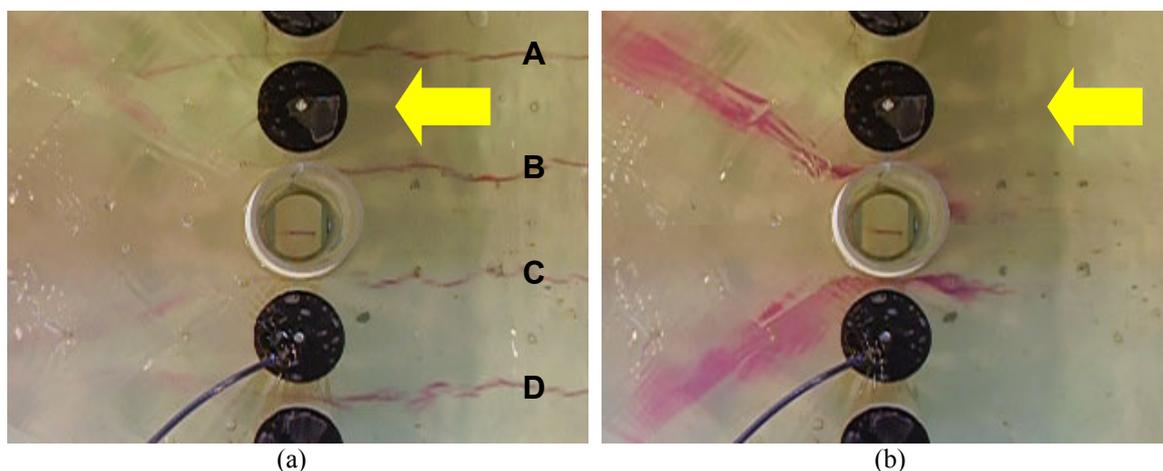


Figura 6. Visualização do escoamento sobre uma fileira de tubos em canal de água. $Re = 5,28 \times 10^4$. (a) 60 mm abaixo da parede superior da seção de testes, (b) 60 mm acima do fundo do canal.

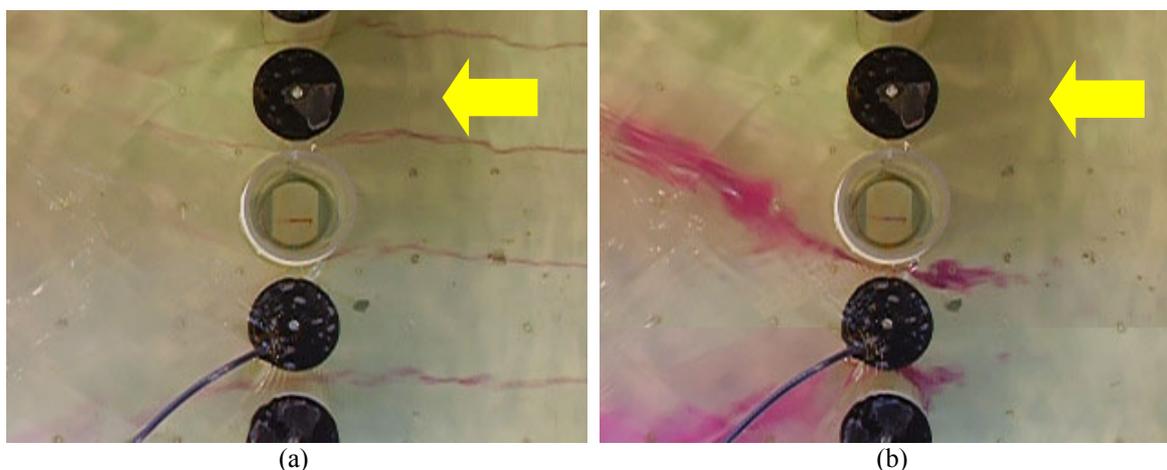


Figura 7. Visualização do escoamento sobre uma fileira de tubos em canal de água. $Re = 5,15 \times 10^4$. (a) 60 mm abaixo da parede superior da seção de testes, (b) 60 mm acima do fundo do canal.

3.3. Duas fileiras de tubos

Como pode ser visto na Fig. 8(a), ao atravessar a primeira fileira de tubos, o escoamento não sofre desvio, mantendo a direção principal do escoamento até alcançar a segunda fileira. Nesse ponto, nota-se, pela visualização através do espelho, que uma componente vertical passa a existir, desviando a direção principal do filete de tinta. Neste caso, não há uma direção característica para cima ou para baixo, a flutuação se dá igualmente nas duas direções. Na Figura 8(a), também se pode identificar que há uma tendência do escoamento em formar uma esteira com desvio à direita (convenção de quem olha de montante para jusante) formada pela fusão dos escoamentos das fendas A, B e C. O escoamento da fenda D segue acompanhando a direção longitudinal. Já na região do fundo, o escoamento das quatro fendas segue uma tendência de escoamento à esquerda. A Fig. 8(b) mostra apenas o jato que emerge da fenda C próximo ao fundo, que segue a direção à esquerda.

Na Figura 9, é mostrado um segundo modo de geração da esteira sobre duas fileiras de tubos. A Figura 9(a) mostra que na região mais próxima à parede superior, o escoamento das fendas A e B fundem-se atrás do tubo 2, enquanto o escoamento das fendas C e D fundem-se atrás do tubo 4, formando duas esteiras principais. No escoamento de fundo, há uma tendência de fusão das quatro esteiras aproximadamente atrás do tubo 2. A Figura 9(b) mostra o escoamento que emerge da fenda C, sendo desviado para a direita.

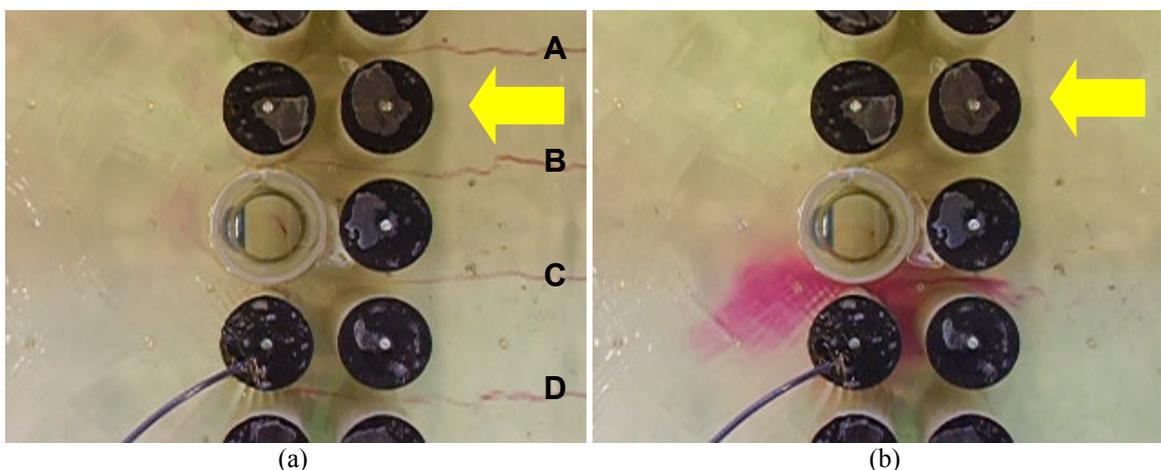


Figura 8. Visualização do escoamento sobre duas fileiras de tubos (ensaio 1). $Re = 4,16 \times 10^4$. a) injeção a 60 mm da parede superior, b) injeção a 60 mm do fundo.

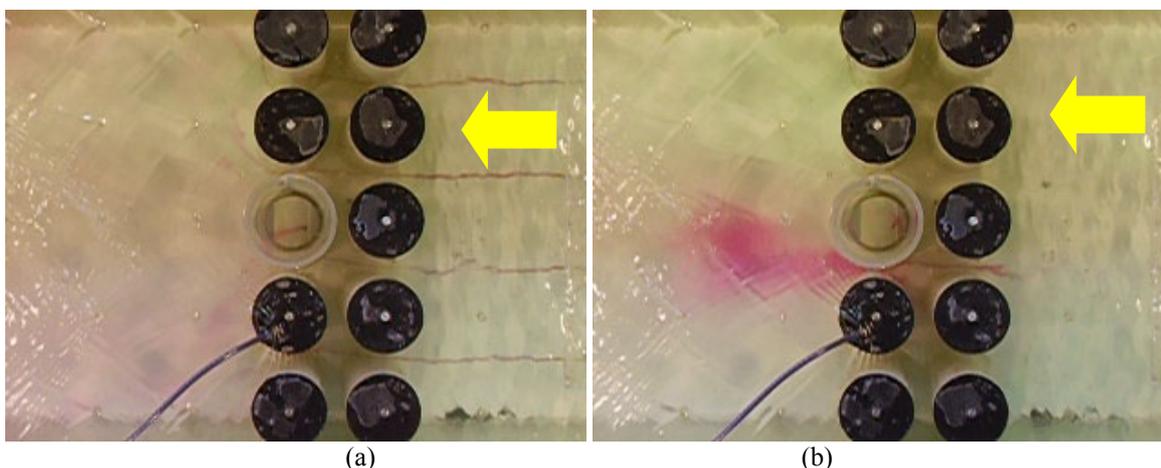


Figura 9. Visualização do escoamento sobre duas fileiras de tubos (ensaio 2). $Re = 5,09 \times 10^4$. a) injeção a 60 mm da parede superior, b) injeção a 60 mm do fundo.

3.4 Três fileiras de tubos

Para o escoamento sobre três fileiras de tubo, a partir de jusante da segunda fileira há uma forte componente transversal. No primeiro ensaio, mostrado na Fig. 10(a) o escoamento das fendas próximo à parede superior, tende para a esquerda, enquanto que, próximo ao fundo (Fig. 10(b)), o escoamento tende para a direita. Observando-se o filete de tinta, injetado na altura média dos tubos através do espelho, percebe-se que ele flutua, mantendo, porém, uma tendência de desvio predominante para cima.

No segundo ensaio, mostrado na Fig. 11, os sentidos das componentes transversais são contrários nas regiões superior e inferior. Para esse caso a componente vertical, vista através do espelho, apesar de intensa flutuação, apresenta sempre um desvio com tendência para cima.

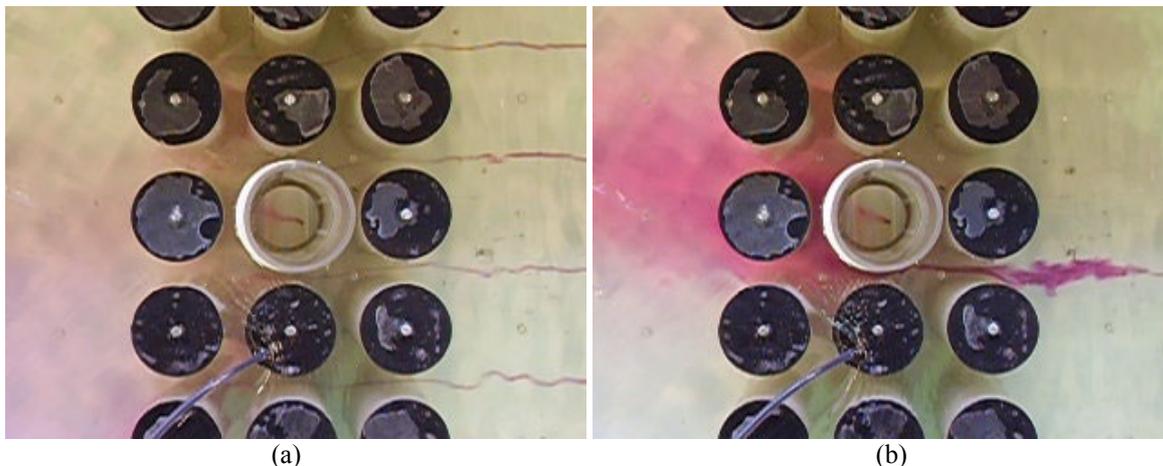


Figura 10. Visualização do escoamento sobre três fileiras de tubos (ensaio 1). $Re = 4,09 \times 10^4$. a) injeção a 60 mm da parede superior, b) injeção a 60 mm do fundo.

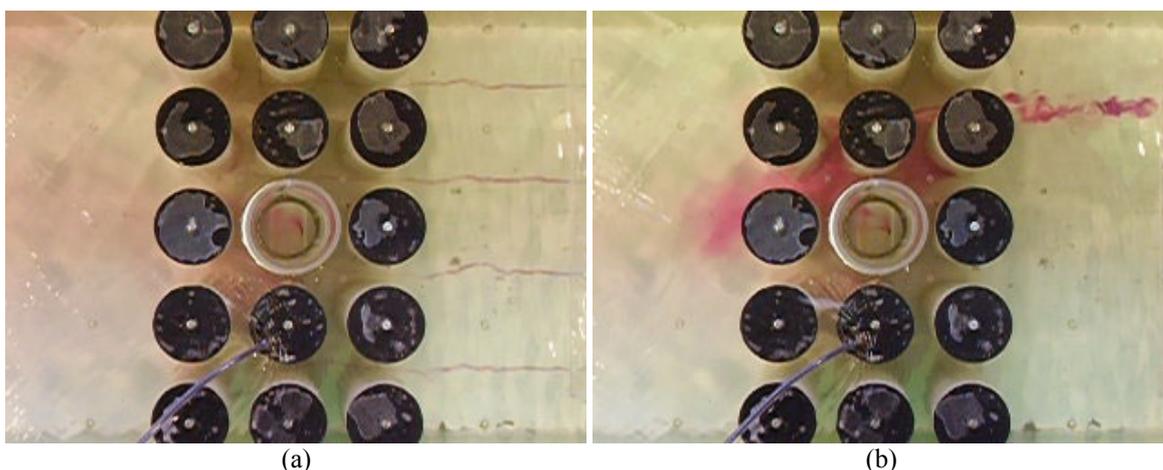


Figura 11. Visualização do escoamento sobre três fileiras de tubos (ensaio 2). $Re = 4,03 \times 10^4$. a) injeção a 60 mm da parede superior, b) injeção a 60 mm do fundo.

3.4. Banco de tubos

O primeiro ensaio para o banco de tubos completo é mostrado na Fig. 12. Pode ser visto que o escoamento próximo à parede superior sofre um desvio para a esquerda e o filete de tinta visto através do espelho tem uma tendência para baixo (Fig. 12(a)). O escoamento próximo ao fundo é desviado para a direita (Fig. 12(b)). Através do espelho, pode-se observar que há muita flutuação na sua direção principal, contudo com uma maior tendência para baixo (Fig. 12(c)). O escoamento visto a partir da lateral mostra, atrás da primeira fileira, conforme também pode ser visto nas vistas em planta, um escoamento alinhado e somente atrás da segunda fileira é que as componentes transversais e verticais passam a atuar de forma mais intensa (Fig. 12(d)). Nesse caso, também pode ser visto que a tendência da tinta injetada é dispersar-se, seguindo uma direção para baixo.

O segundo ensaio mostrado para o banco de tubos completo segue um padrão de escoamento oposto ao primeiro ensaio, ou seja, o escoamento próximo à parede superior ocorre com desvio à direita (Fig. 4.13(a)) e o escoamento de fundo com desvio à esquerda (Fig. 13(b)). No espelho, é visto um desvio no plano vertical para cima na altura média dos tubos (Fig. 13(c)).

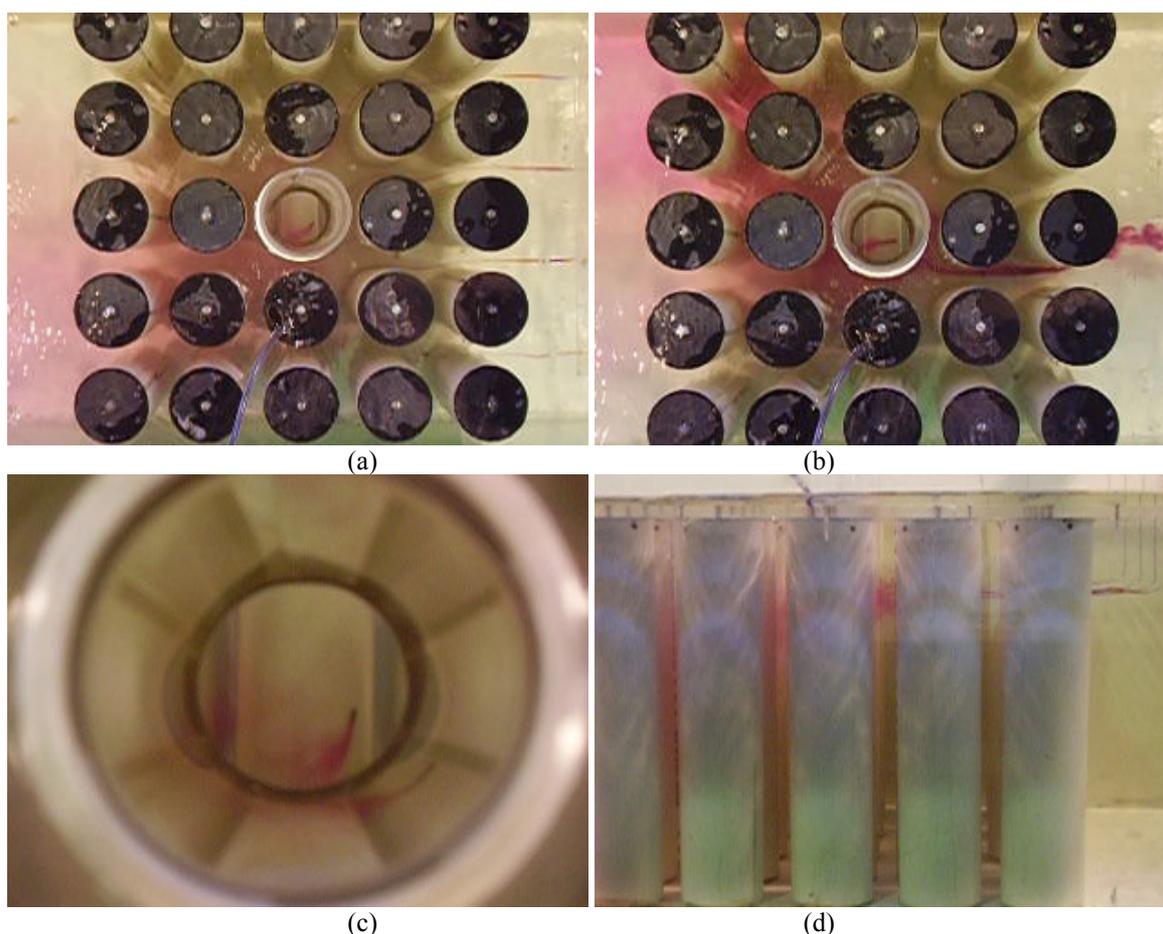


Figura 12. Visualização do escoamento sobre o banco de tubos completo (ensaio 1). $Re = 3,07 \times 10^4$. a) injeção a 60 mm da parede superior, b) injeção a 60 mm do fundo, c) detalhe visto através do espelho, d) vista lateral.

4. Conclusões

Neste trabalho é apresentado um estudo de visualização de escoamento sobre diferentes arranjos de tubos.

Os experimentos realizados com dois tubos posicionados lado a lado em relação ao escoamento permitiram visualizar a presença do escoamento desviado e a geração das duas esteiras características.

Para os experimentos com uma fileira de tubos as visualizações apontaram para a possibilidade de desenvolvimento de diferentes padrões de escoamento da esteira. Em um primeiro identificado, os jatos que emergem das fendas entre os tubos, formam duas células de esteiras coalescidas, posicionadas atrás dos tubos 2 e 4. Além desse, outro padrão de formação das esteiras também foi identificado. Foi possível verificar, que para o caso do escoamento sobre uma fileira de tubos transversal ao escoamento, não há a geração de uma componente transversal ao escoamento de magnitude considerável e nem componente na direção do eixo dos tubos.

Nos estudos com os bancos de tubos foram identificadas componentes transversais ao escoamento principal, que levam ao aparecimento de tridimensionalidades com escala da ordem da dimensão do canal. A ocorrência de tal fenômeno pode tornar-se uma importante origem de instabilidades dinâmicas, visto que pode alterar os coeficientes de sustentação e arrasto dos tubos, alterando a resposta dinâmica das estruturas envolvidas. Esse fenômeno foi visualizado usando um banco de tubos com razão de espaçamento de 1,26 na faixa de números de Reynolds que determina o regime subcrítico, onde se espera que os fenômenos gerados sejam independentes da velocidade do escoamento.

Os experimentos de visualização permitiram reconhecer que esse escoamento transversal começa a ocorrer atrás da segunda fileira do banco de tubos e, em função dos diversos arranjos visualizados, leva a concluir que isso é uma característica que ocorre a partir do lado de jusante da segunda fileira, em um banco com no mínimo mais uma fileira após a segunda.

O estudo realizado reforça a idéia de que, em sendo a turbulência um fenômeno tridimensional, as hipóteses de bidimensionalidade, por vezes adotada como simplificação na análise, podem não levar em conta importantes características do escoamento.

A técnica de visualização do escoamento através de bancos de tubos em dois planos ortogonais mostrou que o efeito de desvio do escoamento no plano horizontal (transversal ao eixo dos tubos) pode ser associado ao desvio na direção do eixo dos tubos, permitindo caracterizar a formação de um escoamento que rotaciona na direção principal. O

sentido de rotação desse escoamento ocorreu de forma aleatória, podendo assumir qualquer um dos sentidos a cada novo experimento.

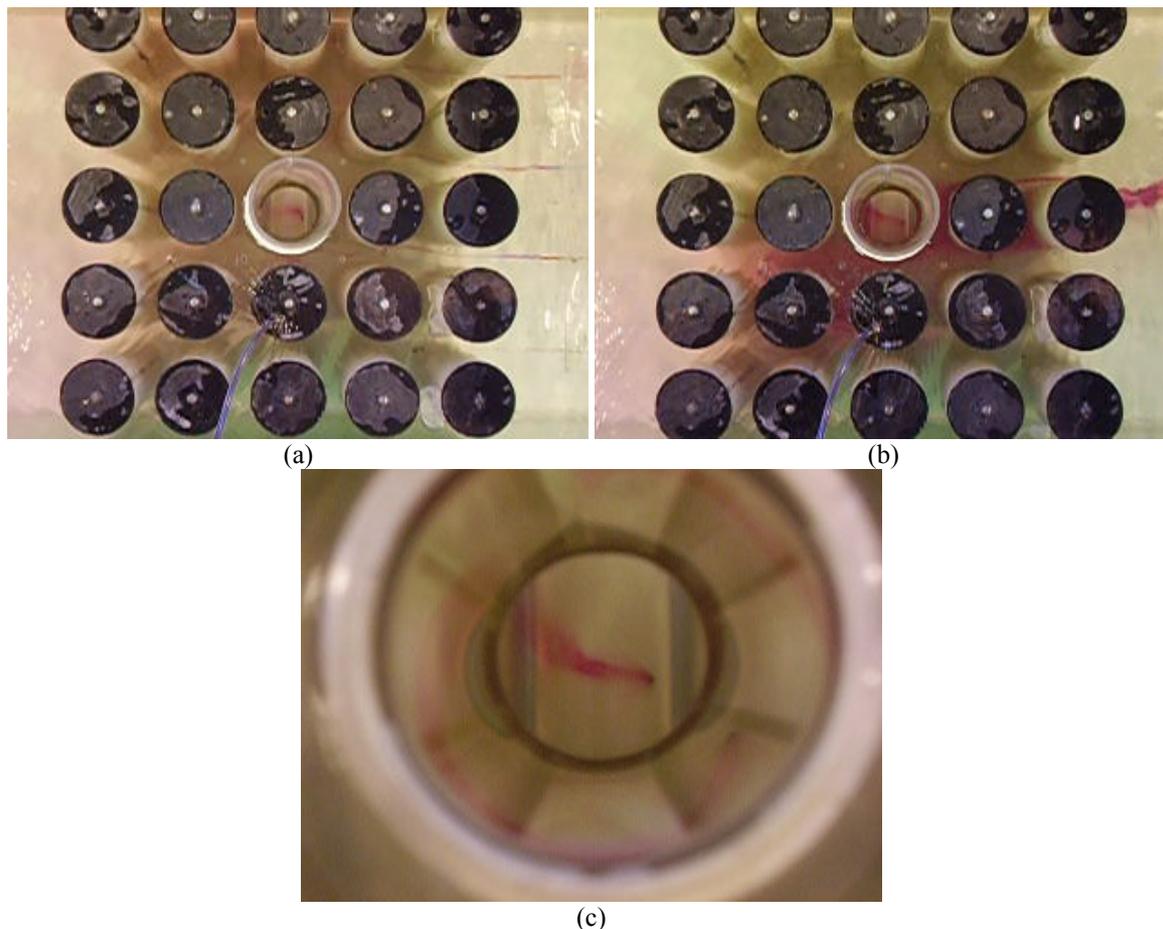


Figura 13. Visualização do escoamento sobre o banco de tubos completo (ensaio 2). $Re = 3,18 \times 10^4$.
a) injeção próxima a parede superior, b) injeção próxima do fundo, c) visualização através do espelho do tubo central.

5. Referências bibliográficas

- Alam, M. M., Moriya, M. and Sakamoto, H., 2003, "Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon", *Journal of Fluids and Structures*, vol. 18, pp. 325–346.
- Guillaume, D. W. and LaRue, J. C., 1999, Investigation of the flopping regime with two-, three- and four-cylinder arrays, *Experiments in Fluids* 27, pp. 145-156.
- Indrusiak, M. L., 2004, "Caracterização de escoamentos turbulentos transientes usando a transformada de ondaletas", Tese de Doutorado, PROMET, UFRGS, Porto Alegre.
- Le Gal, P., Peschar, I., Chauve, M.P. e Takeda, Y., 1996, "Collective behaviour of wakes downstream a row of cilindres", *Phys. Fluids* 8, pp. 2097-2106.
- Oengören, A., e Ziada, S., 1992, "Vortex shedding an acoustic resonance in an in-line tube bundle Part II: acoustic resonance", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 6, pp.293-309.
- Oengören, A., e Ziada, S., 1998, "An in-depth study of vortex shedding, acoustic resonance and turbulent forces in normal triangle tube array", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 12, pp.717-758.
- Olinto, C. L., Indrusiak, M. L. S. e Möller, S. V., 2004, "Experimental study of the bistable flow in tube arrays", *Escola de Primavera de Transição e Turbulência - Anais*, Porto Alegre.
- Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J. and Païdoussis, 1999, Fluid Behaviour of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow, *Journal of Fluids and Structures* 13, pp. 309-338.
- Williamson, C. H. K., 1985, "Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 159, pp. 1-18.

- Xu, S. J., Zhou, Y., So, R. M. C., 2003, "Reynolds number effects on the flow structure behind two side-by-side cylinders", *Physics of Fluids*, Vol.15, No.5, pp.1214-1219.
- Zhang, H. J., Zhou, Y., 2001, "Effect of unequal cylinder spacing on vortex streets behind three side-by-side cylinders", *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 12, pp.3675-3686.
- Ziada, S., 2000, "Flow periodicity and acoustic resonance in parallel triangle tube bundles", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 14, pp.197-219.
- Ziada, S., e Oengören, A., 1993, "Vortex shedding in an in-line tube bundle with large tube spacing", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 7, pp.661-687.
- Ziada, S., Oengören, A. and Bühlmann, E. T., 1989, "On acoustical resonance in tube arrays. Part I: Experiments", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 3, pp.293-314.
- Ziada, S., Oengören, A., 1992, "Vortex shedding and acoustical resonance in an in-line tube bundle - Part I: vorticity shedding", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 6, pp.271-292.

6. Direitos Autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

FLOW VISUALIZATION IN TUBE BANKS

Cláudio Rodrigues Olinto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PROMEC
Rua Sarmento Leite, 425, Porto Alegre, RS
dfscro@furg.br

Luiz Augusto Magalhães Endres
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH
endres@iph.ufrgs.br

Sérgio Viçosa Möller
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PROMEC
svmoller@ufrgs.br

Abstract. *The turbulent flow through tube banks is present at several engineering application, specially heat exchangers tubes and bars. The way that the flow occurs affects the heat transfer and static and dynamic loads on solid structures. The objective this study is to understand the random and transient behavior of the instabilities and phenomena that occur in the first rows of tube banks and propagates to its interior. The visualization is a very important tool for the flow understanding and analysis, being an auxiliary instrument for measurement works and numerical simulations. This work presents flow visualizations on quadrangular tube arrays, made a water channel for Reynolds number in a range of $1,2 \times 10^4$ to $5,3 \times 10^4$. The results show the presence of instabilities generated from the second row of the tube bank, which propagates to the interior of the bank, generating a behavior where the three orthogonal components of the flow are equally important.*

Keywords. *Tube banks, turbulent flow, flow visualization.*