

## UM ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM CAVIDADES ABERTAS

### **Eduardo F. Mega**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil n.º 56,  
CEP 15385-000

[eafmega@globocom.com](mailto:eafmega@globocom.com)

### **Sergio S. Mansur**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil n.º 56,  
CEP 15385-000

[mansur@dem.feis.unesp.br](mailto:mansur@dem.feis.unesp.br)

### **Edson Del Rio Vieira**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil n.º 56,  
CEP 15385-000

[delrio@dem.feis.unesp.br](mailto:delrio@dem.feis.unesp.br)

### **Vinicius Souza Morais**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Brasil n.º 56,  
CEP 15385-000

[vinicius@dem.feis.unesp.br](mailto:vinicius@dem.feis.unesp.br)

**Resumo.** *Este trabalho apresenta um estudo experimental do escoamento no interior de cavidades abertas com diferentes razões de aspecto, para diferentes números de Reynolds, utilizando a visualização de escoamentos por adição de traçadores sólidos ao fluido de trabalho como ferramenta de investigação. Os ensaios experimentais foram conduzidos num pequeno canal de água, operado em circuito fechado. As imagens dos escoamentos foram capturadas com o auxílio de uma câmera fotográfica digital, analisadas e comparadas com alguns resultados numéricos e experimentais de outros autores.*

**Palavras-chave:** *Cavidade aberta; escoamento; experimental.*

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento dentro de cavidades abertas constitui um problema recorrente em várias aplicações de engenharia, apresentando, ao mesmo tempo, forte interesse científico e industrial. Apesar da simplicidade geométrica que caracteriza este problema, o escoamento no interior da cavidade pode ser bastante complexo, com a presença de recirculações periódicas e outras estruturas turbilhonares, que interagem entre si. A dinâmica particularmente ativa deste tipo de escoamento pode induzir o desgaste prematuro de estruturas fixas expostas à ação de correntes fluviais ou marítimas, além de intensificar o ruído em máquinas, equipamentos e veículos aéreos, terrestres e marítimos, como, por vezes, ocorre em fendas existentes sobre a carroceria de veículos automotores, casco de embarcações ou sobre a fuselagem de aeronaves.

Esteve *et al.* (2000) apresentaram um estudo experimental do comportamento do escoamento no interior de uma cavidade longa, para baixos números de Reynolds. Os ensaios foram conduzidos em um túnel de vento aberto, para uma cavidade com razão de aspecto de 10. Foram utilizadas duas velocidades de aproximação,  $U_0 = 12$  m/s e  $U_0 = 20$  m/s, ambas com uma intensidade de turbulência na corrente livre de menos de 1%. Os números de Reynolds para essas condições de velocidade foram, respectivamente,  $1,2 \times 10^6$  e  $2,1 \times 10^6$ . As velocidades axial e transversal foram

determinadas por velocimetria a laser Doppler (LDV). Os resultados obtidos pelos autores mostraram que, em cavidades longas, sob tais condições, apareceram duas zonas de recirculação em cada um dos lados da região de estagnação, com dois turbilhões próximos às faces dos degraus.

Num estudo voltado para a dispersão de poluentes em *canyons* urbanos, Kim *et al.* (2001) apresentaram um estudo numérico para investigar o escoamento ao redor de três diferentes geometrias. A primeira delas consiste em uma colina isolada, a segunda, é composta de dois edifícios dispostos lado-a-lado e a terceira, é composta por uma colina e dois edifícios em série. Os cálculos 2D foram realizados utilizando-se modelagem  $k-\epsilon$  para o fechamento da turbulência. O modelo numérico usado neste estudo empregou um sistema de malha não uniforme com 190 células na horizontal e 82 células na vertical. As equações foram resolvidas em um sistema de malha com arranjo desencontrado, usando o Método de Volumes Finitos. Para a primeira simulação, os resultados mostraram que a inclinação da colina é um fator importante no contexto do problema, e o nível médio da poluição aumenta imediatamente logo após a base frontal da colina e se estende para um local próximo à crista da colina. Já para a segunda simulação, observou-se que, com o aumento da altura dos edifícios, as recirculações se tornam cada vez maiores. Uma recirculação formada atrás do segundo edifício sofre interferência da esteira formada pelo primeiro edifício. Uma outra recirculação importante é formada na frente do primeiro edifício, devido ao choque do fluido com a parede frontal do prédio. O valor da concentração dos poluentes decresce com o aumento da altura dos edifícios. No interior do *canyon*, a concentração dos poluentes é menor do que nas outras regiões. Na presença dos três obstáculos em série, (colina e edifícios), não se observa a presença de uma zona de recirculação atrás da colina, quando a altura desta é maior ou igual a dos edifícios, porém com o aumento da altura dos edifícios esta zona de recirculação se faz presente, pois a recirculação é gerada pelo edifício e não pela colina. Em relação a dispersão dos poluentes, quando a poluição passa sobre o *canyon*, a dispersão vertical e o nível médio da poluição são reduzidos, em comparação com o caso do *canyon* urbano isolado.

No presente trabalho se desenvolveu em estudo experimental de visualização de escoamento no interior de cavidades abertas, para diferentes números de Reynolds, utilizando exclusivamente traçadores sólidos misturados ao fluido como técnica de visualização. Os resultados obtidos foram analisados e comparados com dados de outros autores, apresentando boa concordância.

## 2. INSTALAÇÃO E TÉCNICA EXPERIMENTAL

A configuração do escoamento numa cavidade aberta depende fortemente da velocidade  $U_0$  da corrente livre, bem como dos parâmetros  $h$ ,  $b$ ,  $b_e$ ,  $b_s$ ,  $H$  e  $W$ , mostrados na Figura 2.1, que definem geometricamente a cavidade. Para a definição das cavidades ensaiadas, foi variado o parâmetro ( $b$ ), a fim de simular cavidades com diferentes razões de aspecto ( $b/h$ ).

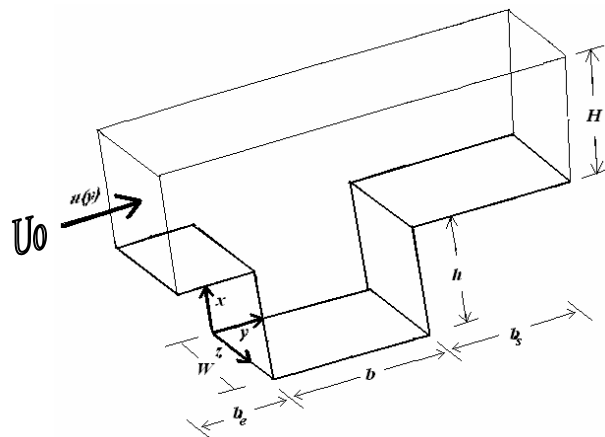


Figura 2.1: Cavidade aberta tridimensional: definição de parâmetros físicos e geométricos.

## 2.1 Dispositivo Experimental

O sistema de geração de escoamento utilizado neste trabalho consiste de um canal de água, que opera em um sistema de circuito fechado. A Figura 2.2 ilustra o esquema do canal de água. Os reservatórios R1 e R2 estão interligados pela bomba BA, que retira água do reservatório R2, para alimentar o reservatório R1. A seção de testes possui dimensões internas de 140 x 190 x 600 mm, onde permite a rápida substituição das cavidades em seu interior.

A água ao entrar no reservatório R1 passa por uma placa perfurada PP e em seguida, por um sistema de telas TL localizada nas extremidades da contração, a fim de amortecer perturbações indesejáveis que por ventura possam aparecer, gerando um escoamento de boa qualidade na seção de testes, caracterizado por um perfil de velocidades razoavelmente uniforme e numa condição de estabilidade satisfatória à realização dos ensaios. O controle da vazão de água na seção de testes é feito pela válvula VA, onde a leitura da vazão é obtida em manômetro vertical de mercúrio, através de uma placa de orifício localizada logo após a válvula VA.

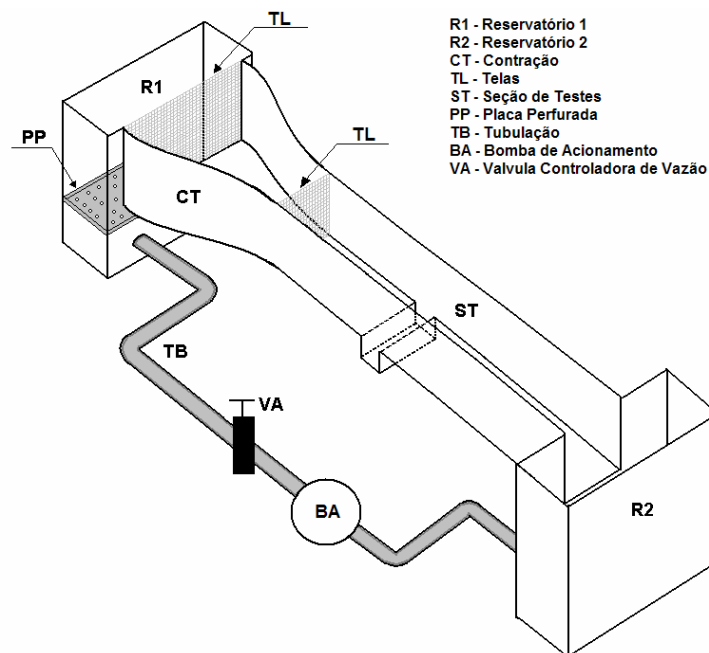


Figura 2.2: Esquema do canal de água

## 2.2. Dispositivo e Técnica de Visualização

A técnica de visualização por sementeira de traçadores sólidos no fluido de trabalho é, frequentemente, combinada com a iluminação por folha de luz, para permitir a observação visual de uma ampla variedade de escoamentos. Neste caso, o sistema de iluminação envolve, na maioria das vezes, a utilização de uma fonte laser, cujo feixe luminoso deve incidir sobre uma lente bicilíndrica ou sobre um artefato rotativo com faces espelhadas, para produzir uma folha de luz no interior da região de interesse. Ao serem iluminadas, as partículas sólidas, que idealmente devem ser arrastadas pelo escoamento como um escalar passivo, promovem o espalhamento da luz incidente (*scattering*), permitindo uma excelente condição para a visualização do escoamento.

No presente projeto, entretanto, devido à indisponibilidade de uma fonte laser com potência suficiente para a execução desta tarefa, foi necessária a montagem de um sistema adaptado, que utiliza um projetor de slides como fonte luminosa. Para isso, uma folha de papel de cor branca, contendo apenas o desenho de uma linha reta bastante fina, foi inicialmente fotografada e, a partir daí, um slide negativo foi confeccionado. Como se pode observar na Figura 2.3, esta linha, que era negra sobre a folha de papel, aparece como um risco transparente sobre o slide negativo. Uma vez inserido no projetor de slide, apenas este risco permitirá a passagem da luz, gerando uma folha iluminada, propícia à visualização de escoamentos.

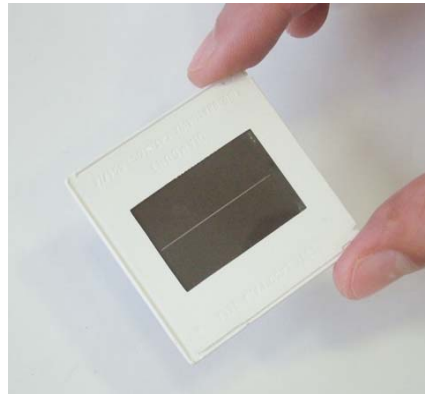


Figura 2.3: Slide negativo contendo uma linha transparente, confeccionado para geração de uma folha de luz.

Como o canal de água utilizado nos ensaios é horizontal, o projetor de slides foi posicionado sobre a seção de testes, com o auxílio de um suporte em madeira, como mostra a Figura 2.4. Para evitar a entrada da luminosidade do ambiente na seção de testes, os ensaios foram realizados no período noturno e todo o aparato experimental, incluindo a câmera fotográfica, foi envolto por uma lona preta, como pode ser visto na Figura 2.5. Para permitir o acesso visual ao escoamento e facilitar a operação de enquadramento e focagem, um monitor de vídeo de 10" de alta resolução foi acoplado à câmera fotográfica.



Figura 2.4: Aparato experimental com o suporte de fixação do projetor de slides



Figura 2.5: Aparato experimental envolto por uma lona preta.

Partículas pliolight foram utilizadas como traçadores sólidos, que possuem densidade um pouco inferior à da água, mas que se mostraram bastante adequadas para a realização dos ensaios.

### 2.3. Captura e Processamento de Imagens

As imagens foram capturadas por uma câmera digital Fujifilm FinePix S7000, de 6.0 Megapixels e zoom óptico de 3X. A captura foi realizada com longo tempo de exposição, permitindo identificar o caminho percorrido pelas partículas. Para as diferentes condições de teste, foram feitas várias fotografias, permitindo encontrar, para cada caso, o tempo de exposição ideal, capaz de fornecer as melhores imagens do escoamento. Após o processo de captura, as imagens foram submetidas a um minucioso trabalho de edição e tratamento, a fim de facilitar sua visualização e, sobretudo a compreensão dos fenômenos discutidos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos segundo a razão de aspecto das cavidades que se prestaram à realização dos ensaios. Para cada arranjo com uma determinada razão de aspecto, variou-se a velocidade do escoamento, de tal forma que o número de Reynolds correspondentes fossem fixados em 500, 700, 1000 e 1300. O número de Reynolds foi calculado, baseando-se na altura da cavidade ( $h$ ) e na velocidade uniforme do escoamento do canal de entrada. A vazão do escoamento que flui através da seção de testes foi obtida com o auxílio de um manômetro vertical de mercúrio, através de uma placa de orifício. Os resultados são mostrados na forma de imagens dos escoamentos observados.

### 3.1. Cavidade com razão de aspecto $b/h = 1$

A Figura 3.1 apresenta imagens do escoamento visualizado pela técnica de traçadores sólidos misturados ao fluido, enquanto a Figura 3.2 apresenta imagens do escoamento obtidas com a técnica de injeção de corante líquido, resultados estes, obtidos pelo próprio autor do presente artigo, em estudos anteriores aos estudos aqui apresentados. Os dois ensaios foram realizados no interior da mesma cavidade aberta, com razão de aspecto  $b/h = 1$ , para diferentes números de Reynolds. Como pode ser observado, os escoamentos possuem basicamente o mesmo comportamento, mas são visualizados com maior clareza e riqueza de detalhes para a técnica dos traçadores sólidos (Figura 3.1).

A comparação entre as Figuras 3.1(a) e 3.2(a) permite observar que, para  $Re = 500$ , a mesma recirculação alongada no alto da cavidade aparece em ambos os ensaios, com o fluido na parte inferior da geometria praticamente estagnado. Observa-se também, nas demais figuras, que a técnica de adição de traçadores sólidos ao fluido, torna mais evidente a presença de uma recirculação de tamanho comparável a altura da cavidade ( $h$ ), para Reynolds maiores que 500. Além disso, verifica-se, com bastante nitidez, que o centro destas recirculações muito se aproximam do centro geométrico da cavidade. Mesmo as pequenas zonas de recirculação nos cantos inferiores da cavidade tornam-se mais facilmente visíveis, sobretudo na Figura 3.1(d), quando comparada com a Figura 3.2(d).

A Figura 3.3 confronta os resultados do presente trabalho com os resultados da simulação numérica de Frigo (2004), apresentando ótima concordância. Na Figura 3.3(a), as regiões identificadas pelas setas de números 1 e 2 evidenciam duas pequenas zonas de recirculação de notável semelhança com a Figura 3.3(b), tanto em suas localizações como em suas dimensões. Além disso, o círculo indicado pela seta de número 3 destaca a presença de uma pequena instabilidade com um pequeno bico no canto superior esquerdo da cavidade, também observado nos resultados de Frigo (2004)



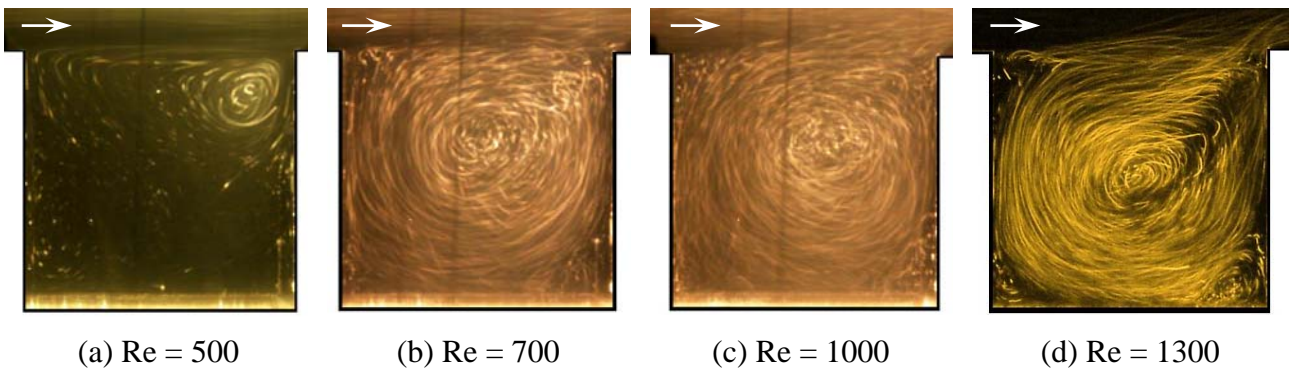


Figura 3.1: Cavidades com  $b/h = 1$ , visualizadas pela técnica dos traçadores sólidos.

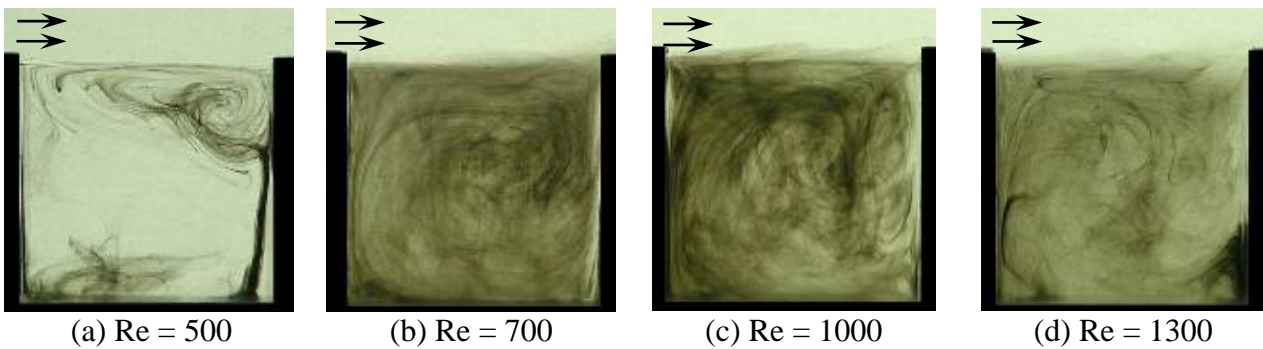


Figura 3.2: Cavidades com  $b/h = 1$ , visualizadas pela técnica de injeção de corante líquido.

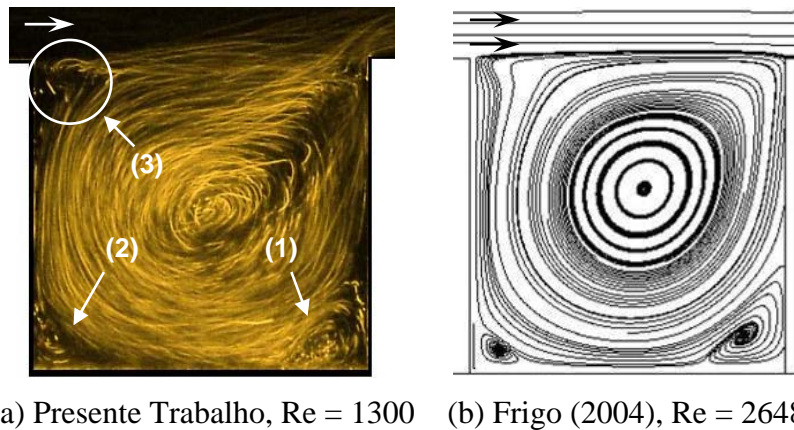


Figura 3.3: Cavidades com  $b/h = 1$  em regime permanente.

### 3.2. Cavity com razão de aspecto $b/h = 2$

A Figura 3.4 apresenta imagens do escoamento em uma cavidade aberta com razão de aspecto  $b/h = 2$ , para diferentes números de Reynolds. Para essa razão de aspecto, a interação do fluxo recirculante interno e o escoamento no canal acima da cavidade se torna mais evidente, quando comparada com a cavidade quadrada ( $b/h = 1$ ). Além disso, fica bastante nítida a presença de duas recirculações contrarrotativas com tamanho de ordem  $h$  dentro da geometria estudada. Com a utilização da técnica de injeção de corantes líquidos, as dimensões e as posições do centro de rotação destas estruturas turbilhonares não eram tão evidentes. Em contrapartida, com a sementeira de traçadores sólidos e iluminação por folha de luz, não foi possível identificar as instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz geradas pela presença de uma zona cisalhante no alto da cavidade.

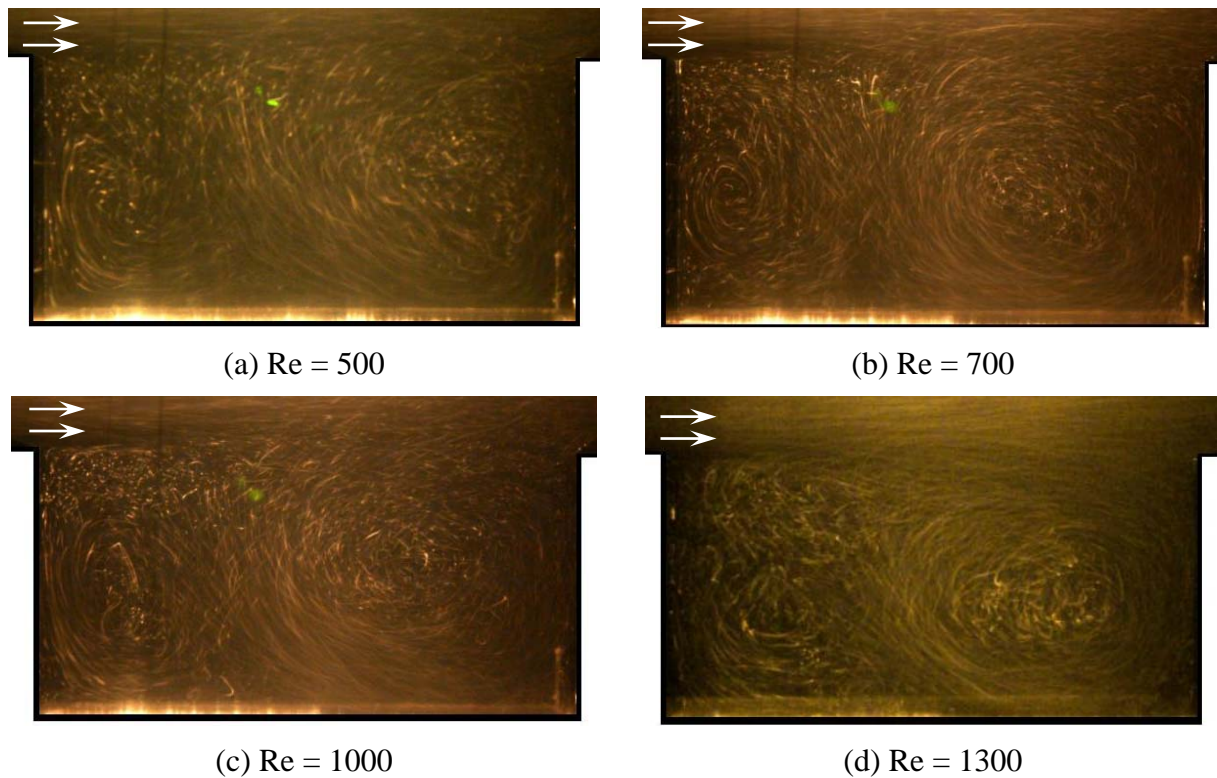


Figura 3.4: Cavityde com razão de aspecto  $b/h = 2$  em regime permanente.

A título de comparação, a Figura 3.5 mostra imagens do mesmo escoamento, visualizado com o auxílio destas duas técnicas. Nota-se, no alto da Figura 3.5(a), a presença das referidas instabilidades, que se formam pelo descolamento da camada limite na aresta superior esquerda da cavityde e são advectadas em direção à face direita. Na Figura 3.5(b), estas estruturas não podem ser observadas, mas as duas recirculações internas são mais facilmente identificadas.

Embora não estejam muito visíveis na Figura. 3.4, em todos estes casos, observou-se a presença de duas pequenas recirculações secundárias nos ângulos inferiores da cavityde, acompanhado as outras duas recirculações contrarotativas de tamanho de ordem  $h$ , que se mantêm estacionárias. A Figura. 3.6 confronta os resultados da simulação numérica de Frigo (2004) com os resultados do presente trabalho. Observa-se na Figura 3.6(b) a presença de duas pequenas bolhas de recirculação nos cantos inferiores da geometria, as quais não estão visíveis na Figura 3.6(a). Porém, as duas recirculações contrarotativas de ordem  $h$  se fazem presentes, conforme na Figura 3.6(b), as quais muito se assemelham tanto em suas posições quanto em suas dimensões, confirmando assim, os resultados da simulação numérica de Frigo (2004).

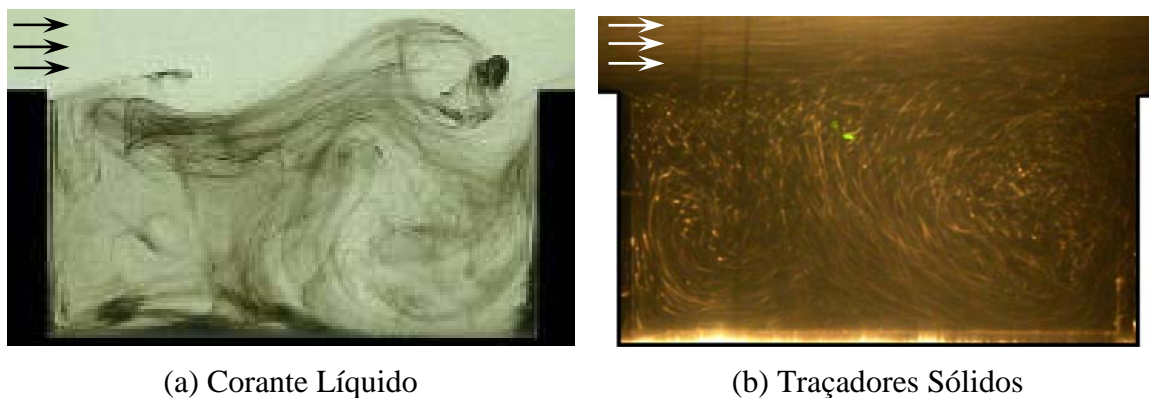
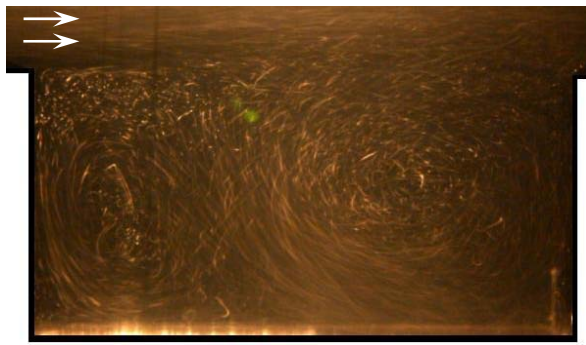
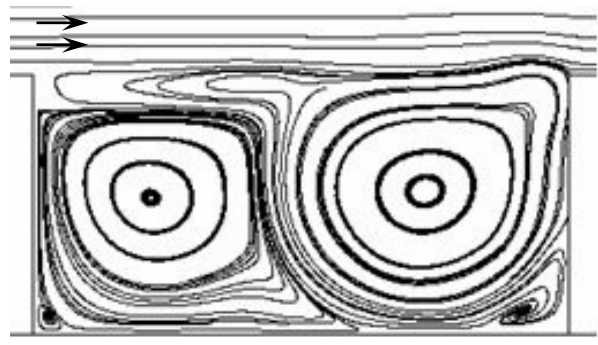


Figura 3.5: Cavityde com razão de aspecto  $b/h = 2$  para  $Re=500$ .

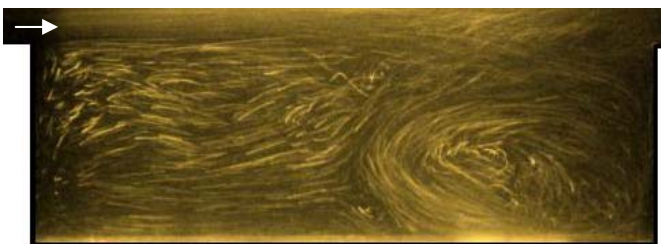
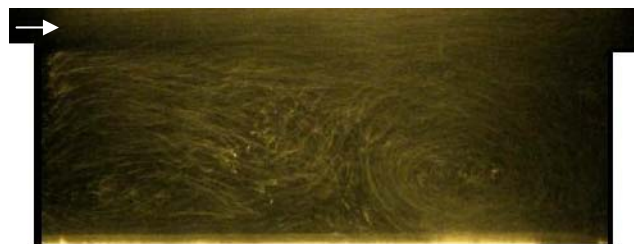
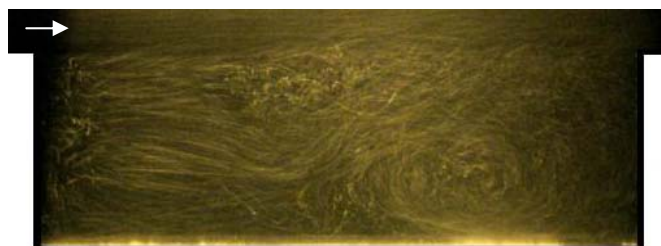
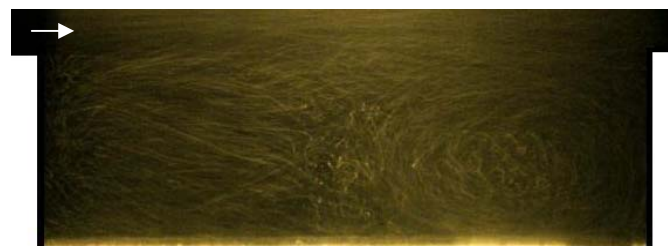


(a) Presente Trabalho,  $Re = 1000$ (b) Frigo (2004),  $Re = 2648$ Figura 3.6: Cavity com  $b/h = 2$  em regime permanente.

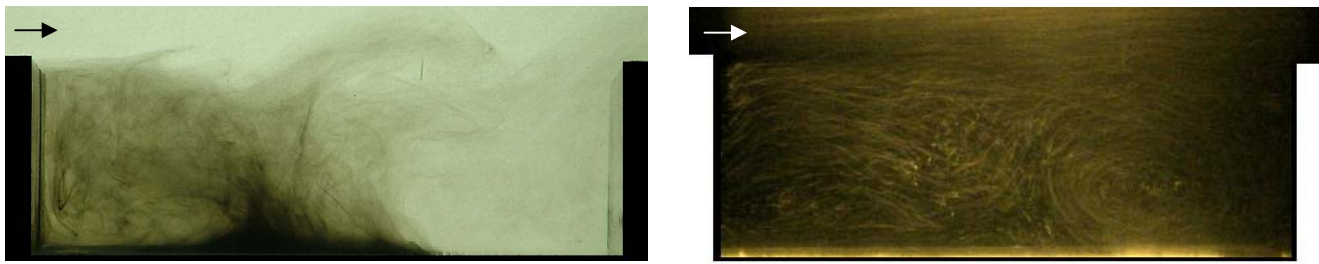
### 3.3. Cavity com razão de aspecto $b/h = 3$

A Figura 3.7 apresenta imagens do escoamento em uma cavity aberta com razão de aspecto  $b/h = 3$ , para diferentes números de Reynolds. Diferentemente do se pensou inicialmente, quando da análise dos resultados obtidos com a técnica de visualização por injeção de corantes líquidos, parece não haver duas recirculações contrarrotativas no interior da cavity. As imagens conseguidas com o uso de traçadores sólidos, parecem revelar a existência de apenas uma grande recirculação próxima à parede direita da cavity. O fluido que ocupa a porção esquerda da cavity, por sua vez, parece se movimentar de forma um tanto desordenada, em direção à grande recirculação. Uma investigação mais aprofundada sobre este tipo de escoamento poderia acrescentar informações importantes para a compreensão deste tipo de escoamento, uma vez que a literatura corrente sobre o assunto é, ainda, pouco abundante.

Com o auxílio da Figura 3.8, observa-se claramente que para técnica de injeção de corantes líquidos, parece haver duas recirculações contrarrotativas, (Figura 3.8(a)), porém para a técnica de traçadores sólidos, observa-se somente uma recirculação próxima a parede direita da cavity, (Figura 3.8(b)). Pode se observar também que, mais uma vez, a utilização de traçadores sólidos iluminados por folha de luz não é adequada para a visualização de estruturas turbilhonares não estacionárias, como as instabilidades de Kelvin-Helmholtz que se fazem presentes no alto da cavity e se deslocam da esquerda para a direita. Para isto, a injeção de corantes líquidos fornecem resultados nitidamente melhores.

(a)  $Re = 500$ (b)  $Re = 700$ (c)  $Re = 1000$ (d)  $Re = 1300$ Figura 3.7: Cavity com razão de aspecto  $b/h = 3$  em regime permanente





(a) Corante Líquido

(b) Traçadores Sólidos

Figura 3.8: Cavity com razão de aspecto  $b/h=3$  para  $Re=700$ 

#### 4. CONCLUSÃO

Na presente etapa do trabalho, foi desenvolvido um estudo experimental do escoamento no interior de cavidades abertas, para diferentes razões de aspecto e diferentes números de Reynolds, utilizando-se exclusivamente traçadores sólidos misturados ao fluido como técnica de visualização.

Em linhas gerais, os novos resultados obtidos pela técnica dos traçadores sólidos, confirmaram as conclusões extraídas dos estudos realizados anteriormente, com a técnica de injeção de corante líquido, acerca da maneira como o fluido se movimenta dentro da cavidade. Para a cavidade com razão de aspecto  $b/h=3$ , as novas imagens obtidas colocam em dúvida a presença de duas grandes recirculações contrarotativas dentro da cavidade. Para uma análise conclusiva, testes mais aprofundados poderiam ser úteis para uma melhor compreensão deste tipo de escoamento.

A técnica de visualização por traçadores sólidos adicionados ao fluido de trabalho se mostrou vantajosa em alguns aspectos, sobretudo para a visualização de estruturas turbilhonares estacionárias. Na cavidade com razão de aspecto  $b/h=2$ , por exemplo, pôde-se observar com mais clareza, as duas recirculações contrarotativas de tamanho de ordem  $h$ , em relação a técnica de injeção de corante líquido, utilizada em estudos anteriores. Para a cavidade com razão e aspecto  $b/h=1$ , pôde-se observar, com muita clareza e riqueza de detalhes, a recirculação de tamanho aproximadamente  $h$  que aparece dentro da cavidade, acompanhada de duas pequenas recirculações que se posicionam nos cantos inferiores. Porém, com o uso dessa técnica, não foi possível capturar as instabilidades Kelvin-Helmholtz formadas na região cisalhante que separa a cavidade do canal que a alimenta.

Por último, vale salientar que as imagens obtidas com a utilização de traçadores sólidos foram bastante satisfatórias, principalmente levando-se em consideração os recursos disponíveis para a iluminação da seção de testes.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Esteve, M.J., Reulet, P. and Millan, P., Flow field characterisation within a rectangular cavity, 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, Portugal, 2000.
- Frigo, L.M., Mansur, S.S., Neto, A.S., Simulação numérica de escoamentos incompressíveis tridimensionais turbulentos e em transição, Tese de Mestrado, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Brasil, 2004.
- Kim, J.J., Baik, J.J., Chun, H.Y., Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89 (2001) 947–966.

#### 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são responsáveis por todo conteúdo deste trabalho.

## EXPERIMENTAL VISUALIZATION OF FLOW IN THE INTERIOR OF OPEN CAVITIES

### **Eduardo F. Mega**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Department of Mechanical Engineering,, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

[eafmega@globocom.com](mailto:eafmega@globocom.com)

### **Sergio S. Mansur**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Department of Mechanical Engineering,, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

[mansur@dem.feis.unesp.br](mailto:mansur@dem.feis.unesp.br)

### **Edson Del Rio Vieira**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Department of Mechanical Engineering,, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

[delrio@dem.feis.unesp.br](mailto:delrio@dem.feis.unesp.br)

### **Vinicius Souza Morais**

UNESP - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Department of Mechanical Engineering,, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

[yvinicius@dem.feis.unesp.br](mailto:yvinicius@dem.feis.unesp.br)

**Abstract:** *This work presents an experimental study of the flow inside open cavities having different aspect ratios, at different Reynolds numbers, using tracing solids mixed to the work fluid for flow visualization. The experimental tests have been driven in a closed circuit water channel. The images of the flows have been captured by means of a digital camera, analyzed and compared with experimental data and numerical results from other authors. A good agreement has been reached.*

**Keywords:** *Open cavities, visualization, flow.*